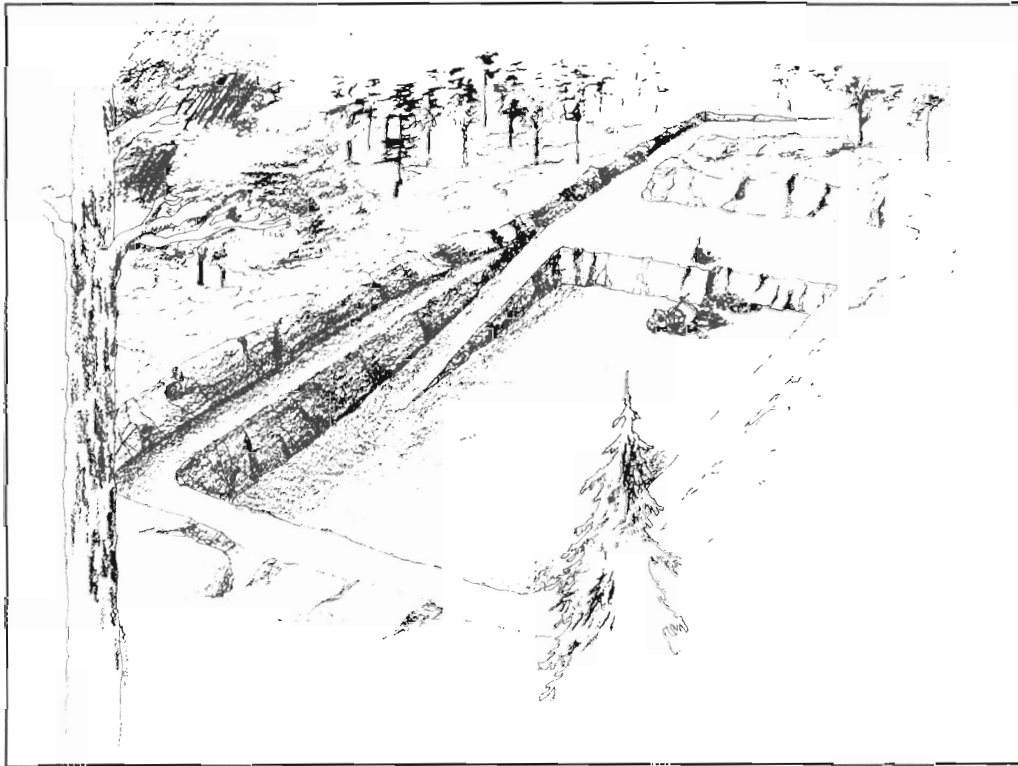




KALLIOKAIVANTO JÄTEHUOLLOSSA ESIRAPORTTI

Usko Anttikoski
Seppo Saarelainen • Seppo Kumar



HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO

KALLIOKAIVANTO JÄTEHUOLLOSSA ESIPUHE

Pääkaupunkiseudun kuntien ja YTV:n jätehuoltolaitoksen yhteistyönä on tehty 1.8.1992 alkaen esiselvitystä kalliokaivannon käytön edellytyksistä jätehuollossa. Esitutkimuksessa on toiminut konsulttina VTT:n Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Selvitykseen on lisäksi ottanut osaa Teknillinen korkeakoulu ja Oulun yliopisto sekä Vaasan kaupunki. Teknologian kehittämiskeskus, TEKES on rahoittanut esiselvitystä. Helsingin kaupungin geotekninen osasto on vastannut tutkimuksen koordinoinnista ja esiraportin kokoamisesta sekä julkaisemisesta.

Ensimmäinen ehdotus sora-aineksen korvaamisesta kallioulouheella ja jätemassojen sijoittamisesta syntyneeseen kaivantoon tehtiin jo 14.3.1980. Tähän mennessä ei tuotekehitystä ole voitu vielä kuitenkaan käynnistää. Kalliokaivanto on varteenotettava vaihtoehtoinen ratkaisu pintakaatopaikalle. Valmistuneen esiselvityksen toivotaan nyt antavan sysäyksen varsinaiselle kehittämistyölle. Liitteenä ovat kuvaukset neljästä kohteesta, joissa voidaan käyttää hyväksi valmista kalliokaivantoa tai tehdä uusia koekaivantoja kalliokaivannon käyttökelpoisuuden selvittämiseksi jätteiden sijoitukseen. Nämä kohteet sijaisevat:

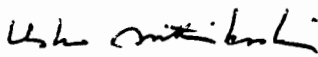
- | | |
|-------------------------|-----------|
| - Espoon Ämmäsuolla | Liite 2.1 |
| - Vantaan Pitkäsuolla | Liite 2.2 |
| - Helsingin Vuosaarella | Liite 2.3 |
| - Vaasan Stormossenilla | Liite 2.4 |

Kalliokaivannon käyttö jätteiden sijoittamiseen tutkimushanke antaa perustan myös sekä yhdyskunta-, että teollisuusjätteen käsittelyteknologialle. Tällöin voidaan saada monenlaista hyötyä:

- saavutetaan pinta-alan säästöjä kaatopaikka-alueella
- kaatopaikka voidaan tuoda lähelle kulutusta
- ympäristöpäästöt ovat hallinnassa
- jätemassojen sekoitusteknologia kehittyä
- sivutuotteiden hyötykäyttö on mahdollista
- vuosittainen taloudellinen hyöty on huomattava
- periaatteet sopivat kaikkiin kuntiin

Esiselvitykseen liittyy myös varsinainen hankeohjelma kalliokaatopaikan kehittämiseksi ja ohjeiden laatimiseksi uudenlaista teknologiaa varten. Uuteen ratkaisuun sisältyy luonnollisesti riskejä, jotka täytyy koeolosuhteissa vielä selvittää. Kalliokaivantoa voidaan luotettavasti suositella käytettäväksi vasta, kun tutkimuksen koko hankeohjelma on toteutettu. Tämän on arvioitu vievän aikaa noin neljä vuotta. Tutkimus käynnistyy välittömästi, kun hankeohjelman rahoituksesta on saatu myönteisiä päätöksiä.

Helsingissä 11.10.1993


Usko Anttikoski
osastopäällikkö

II

PROJEKTIN JÄSENET

Johtoryhmä

Usko Anttikoski pj.	(Hki/geo)
Ossi Ikävalko	(Espoo/geo)
Osmo Koskisto	(Tekes)
Armas Kämppi	(Hkvv)
Jouni Mäntylä	(Vantaa/geo)
Mauri Uusihakala	(YTV)

Työryhmä

Koordinointi :	Seppo Kumar (Hki/geo)
Hankeohjelma :	Usko Anttikoski, Seppo Kumar, Jouko Ritola (VTT)
Tutkimus :	VTT/TGL : Seppo Saarelainen, Arto Ylinen, Markku Salo, Jukka Pöllä, Olli Okko

Teollisuuden näkökulmat :	Martti Keskinen (Rakennus Oy Lemminkäinen) Antero Turunen (Lännen Engineering Oy)
---------------------------	--

Kenttätyö ja tulosten käsittely

Espoon Ämmässuo :	Jukka Pöllä, Arto Ylinen
Vantaan Pitkäsuo :	Jouni Mäntylä, Ossi Ikävalko
Helsingin Vuosaari :	Usko Anttikoski, Jorma Havukainen, Ossi Ikävalko
Vaasan Stormossen :	Timo Martonen (Vaasan Kaupunki), Ossi Ikävalko

III

SISÄLLYSLUETTELO

ESIPUHE.....	I
PROJEKTIN JÄSENET.....	II
SISÄLLYSLUETTELO.....	III

HANKEOHJELMA.....	1-11
--------------------------	-------------

ESITUTKIMUS (VTT, LIITE 1)	
Kalliokaivannon käytön edellytykset jätehuollossa.....	1-50

KOEALUEET (LIITEET 2)

2.1 Espoon Ämmässuo.....	1-10
2.2 Vantaan Pitkäsuo.....	1-12
2.3 Helsingin Vuosaari.....	1-6
2.4 Vaasan Stormossen.....	1-3



TIE-, GEO- JA LIIKENNE-
TEKNIKAN LABORATORIO
Jouko Ritola



HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNINEN OSASTO
Usko Anttikoski
Seppo Kumar

KALLIOKAIVANTO JÄTEHUOLLOSSA

HANKEOHJELMA

1 LÄHTÖKOHTA

Jätekaivannon ja jätehuollon prosessien sijoittamisella kallioon saavutetaan monia ympäristöllisiä ja kansantaloudellisia etuja, joista yhtenä esimerkkinä mainittakoon tilan syntyminen hallitussa kiviaineslouhinnassa lähes ilmaiseksi. Samanaikaisesti kiviaineslouhinnassa syntyville kalliokaivannoille voidaan suunnitella hyötykäyttöä, jolloin välttyään kalliilta jälkikäsittely- ja maisemointitoimenpiteiltä. Muita etuja ovat mm. seuraavat: Ympäristövaikutukset voidaan hallita, kun kaivannon ja sen kallioympäristön läpäisevyysominaisuudet sekä oleellinen pohjavesivirtaus määritetään ennakolta. Kalliokaivanto on geoteknisesti stabiili, jolloin sortumavaaraa ei ole. Syvässä kalliokaivannossa säästetään pintavaihtoehtoon verrattuna huomattavasti maapinta-alaa, mikä merkitsee kaavataloudellisia etuja maankäytön suhteen, ks. kuvaliitteet 2 - 3.

Kalliokaivantoja voitaisiin käyttää esimerkiksi teollisuus- ja yhdyskuntajätteiden käsittelyssä ja loppusijoituksessa. Jätteen kalliosijoituspaikan perustamisedellytyksiä, teknisiä ratkaisuja ja ympäristövaikutusten hallintamenetelmiä ei kuitenkaan ole vielä tutkittu, eikä kehitetty niin pitkälle, että tekniikka olisi suoraan sovellettavissa käytäntöön. Nykyiset kaatopaikkojen suunnittelua ja rakentamista koskevat ohjeet eivät sisällä kallioratkaisuja.

Yhdyskuntajätteen ohella kaatopaikkoja tarvitaan taajamien läheisyydessä mm. rakentamisessa syntyville jättemassoille, energiatuotannossa syntyvälle tuhkalle ja rikinpoistotuotteille sekä jäteveden käsittelyssä syntyvälle orgaaniselle lietteelle. Jos jättemateriaaleja kyetään stabiloimaan, niiden käsiteltävyyttä voidaan parantaa ja liukoisuusominaisuuksia pienentää. Teollisuuden sivutuotteiden stabilointimenetelmiä onkin kehitetty viime vuosina voimakkaasti, mikä parantaa niiden kalliosijoitusmahdollisuuksia.

Tulevaisuudessa kaatopaikkojen sijoittamisessa ja suunnittelussa tulee ympäristövaikutusten arviointi olemaan keskeisiä tehtäviä. Kaatopaikan perustamishankkeisiin tullaan soveltamaan lakia ympäristövaikutusten arviointimenettelystä. Tällöin tullaan kiinnittämään erityistä huomiota siihen, ettei kaatopaikka saastuta maaperää ja pohjavesiä. Kaatopaikan perustamislupaehdoissa tullaan todennäköisesti edellyttämään entistä tarkempaa ja luotettavampaa selvitystä kaatopaikan mahdollisista päästöistä ja niiden pitkäaikaisista ympäristövaikutuksista.

Jätteen kalliosijoituksessa joudutaan hyvin poikkitieteelliselle tutkimusalueelle, jossa joudutaan arvioimaan mm. pitkän aikavälin ympäristövaikutuksia sekä loppusijoituksen luotettavuutta ja turvallisuutta. Suomi on osallistunut yli 20 vuoden ajan kansainväliseen ydinjätteen

loppusijoitustutkimukseen, jossa jätteen kalliosijoitukselle on kehitetty suuri joukko luotettavia teknisiä ratkaisuja sekä tutkimus- ja monitorointimenetelmiä. Kehitettyjä tutkimus- ja valvontamenetelmiä sekä syntynyttä tietotaitoa voidaan suoraan hyödyntää yhdyskunta- ja teollisuusjätteen kalliosijoituksen teknologian ja päästöjen hallintamenettelyn kehittämisessä.

Pääkaupunkiseudun kuntien ja YTV:n jätehuoltolaitoksen yhteistyönä toteutettiin v. 1993 esiselvitys jätekaivannon sijoittamisesta kallioon. Esiselvityksen rahoitti Teknologian kehittämiskeskus, TEKES ja toteutuksesta vastasi Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto. Pääosa esitutkimuksesta toteutettiin VTT:n Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa. Esitutkimuksesta on julkaistu tutkimusraportti / 1 /.

Esiselvityksen yhteydessä on laadittu tämä hankeohjelma kalliokaatopaikan perustamiseen ja käyttöön sekä ympäristövaikutusten hallintaan liittyvästä tutkimus-, tuotekehitys- ja ohjeistustarpeesta.

Kaatopaikan sijoitusalueen kalliorakenteen ja hydrogeologian määrittäminen kokonaisvaltaisesti ja entistä tarkemmin uusimmilla tutkimus- ja mallinnusmenetelmillä muodostaa tärkeän osan hankeohjelman sisältöä. Muita keskeisiä tutkimusalueita ovat kaatopaikan teknisten rakenneratkaisujen sekä ympäristövaikutusten arviointimenetelmien kehittäminen. Käynnistettävillä koekohteilla on tutkimus- ja tuotekehitystyössä keskeinen rooli.

2 TAVOITE

Hankeohjelman tavoitteena on kehittää sellaiset teknistaloudelliset rakenneratkaisut sekä ympäristövaikutusten tutkimus- ja arviointimenetelmät ohjeineen, että kallioon voidaan toteuttaa ympäristövaikutukset huomioon ottaen luotettava sijoituspaikka yhdyskunta-/ teollisuusjätteelle sekä jätehuollon prosesseille.

Sekundäärinenä tavoitteena on kehittää kalliokaatopaikan prosessointimenetelmiä ja -laitteita. Tärkeän kokonaisuuden muodostaa myös kaatopaikalle sijoitettavien teollisuuden sivutuotteiden (esim. kipsit, tuhkat) stabilointimenetelmien tutkiminen ja kehittäminen kaatopaikkakäsittelyn helpottamiseksi sekä päästöjen minimoimiseksi.

Ohjelman tavoitteena on käynnistää 3 - 4 koerakennuskohdetta, joissa kehitetään ja testataan sellaisia tutkimusmenetelmiä, rakenne- ja tiivistysratkaisuja sekä käytön aikaisia valvonta- ja tarkkailujärjestelmiä, että kaatopaikan kallioperään ja pohjaveteen aiheuttamat ympäristövaikutukset voidaan minimoida ja hallita jätehuoltoa koskevien viranomaismääräysten edellyttämällä tavalla. Koekohteiden yhteydessä on tarkoitus kehittää ja testata kaatopaikan ympäristövaikutusten arviointimenetelmiä.

Osana tätä hankeohjelmaa on tarkoitus käynnistää myös kansainvälinen yhteistyöprojekti, joka painottuu jätteen kalliosijoitukselle asetettaviin vaatimuksiin sekä ympäristövaikutusten arviointiin EY:n säännösten mukaisesti. Tämä tutkimusosuus pyritään käynnistämään yhteistyössä eräiden EY:n jäsenmaiden kanssa hakemalla rahoitusta myös EY:n Ympäristöohjelmasta (EC Environment program).

Tavoitteena on käynnistää myös Pohjoismaista yhteistyötä esim. Nordtest-järjestelmän kautta. Tämä olisi suotavaa ottaen huomioon Pohjoismaiden samankaltaiset kallioperäolosuhteet ja tutkimusmenetelmät.

3 TOTEUTUS JA TULOSTEN HYÖDYNTÄMINEN

Hankeohjelma jakautuu taulukon 1 mukaisiin tutkimusalueisiin ja osatutkimuksiin, jotka käynnistetään vaiheittain yhteistyössä jätehuollosta vastaavien organisaatioiden ja alan teollisuuden kanssa. Erityisen tärkeäksi katsotaan koerakennuskohteisiin liittyvät tutkimukset mukaan lukien ympäristövaikutusten tarkkailu- ja arviointimenetelmien kehittäminen.

Esitutkimuksen yhteydessä on valmisteltu koerakentamiskohteet Helsingin Vuosaareen (teollisuuden jäte ja sivutuotteet) sekä Vantaan Pitkäsuolle (rakentamisen ylijäämämassat). Mainittuihin kohteisiin on koekaivannot jo suunniteltu. Myös Espoon Ämmässuo (yhdyskuntajäte) on koerakentamissuunnitelmissa mukana. Mahdollinen soveltuva koekohde olisi myös Vaasan Mustasaaren jätteenkäsittelylaitoksen yhteydessä oleva kalliokaivanto, tilavuudeltaan noin 2 milj.m³ (yhdyskuntajäte).

Hankeohjelman osana kehitettävä ympäristövaikutusten hallintajärjestelmä antaa mahdollisuuden yhdyskunta- ja teollisuusjätteen sekä teollisuuden sivutuotteiden hallittuun sijoitukseen kallioympäristöön. Menetelmä on laajasti teollisuuden ja jätehuollosta vastaavien organisaatioiden sekä ympäristöviranomaisten hyödynnettävissä. Kehitettävä ympäristövaikutusten hallintamenettely ei rajoitu pelkästään kallioympäristöön, vaan sitä voidaan pienin muutoksin soveltaa myös maaperään sijoitettavan jätteen ympäristövaikutusten hallintamenettelynä. Jätteen kalliosijoitusmenettelyllä nähdään myös yhteistyö- ja vientimahdollisuuksia esimerkiksi Kuolan ja Karjalan alueiden teollisuuden ja kaivostoiminnan jäteongelmiin, jotka ovat toistaiseksi ratkaisematta. Suomen ja mainittujen alueiden kallioopera on hyvin samankaltaista ja näin ollen Suomessa kehitetyt tekniset ratkaisut ja menetelmät ovat suoraan sovellettavissa käytäntöön myös rajan toisella puolella.

Taulukko 1. Tutkimusalueet

1 KOEKOHD- JA TEKNOLOGIATUTKIMUS	2 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI- JA HALLINTA	3 PROSESSOINTITEKNIKAT JA -LAITTEET
1.1 Kallion rakenne- ja vedenläpäisevyydetutkimukset - uusien tutkimusmenetelmien soveltaminen 1.2 Koerakentaminen ja in-situ-kokeet - kalliokaivannon hydrologiset kokeet - tiivistyskokeet - jätteen stabilointikokeet (kohta 3.1) - ympäristövaikutusten monitorointi 1.3 3-ulotteinen rakenne- ja hydrogeologinen mallinnus - läpäisevyyden ja alueellisen virtauksen määrittäminen 1.4 Jätekaivannon tekniset rakenne- ja tiivistysratkaisut sekä kustannukset	2.1 Kalliokaatopaikan laatuvaatimukset 2.2 Ympäristövaikutusten arviointi- ja hallintajärjestelmän kehittäminen (maaperä, kallio, rakenne) - rakenne- ja hydrologiset mallit - päästöjen suuruus ja vaikutusalue - tarkkailu- ja valvontajärjestelmät - perustamislupaehdot 2.3 Kalliokaatopaikan perustamis-, käyttö- ja valvontaohjeet	3.1 Prosessointitekniikat - Yhdyskuntajäte - Teollisuuden sivutuotteet 3.2 Prosessointilaittekehitys - Sekoitinlaitteet

4 TYÖOHJELMA

Tutkimusalue 1: KOHDETUTKIMUKSET JA JÄTEKAIVANNON TUOTEKEHITYS

Kohdetutkimukset 1.1, 1.2 ja 1.3

Kussakin koerakentamiskohteessa louhitaan tilavuudeltaan noin 2000 m³:n koekaivanto, jonka dimensiot ovat esim. syvyys 10 m, leveys 10 m ja pituus 20 m. Koekaivannot pyritään sijoittamaan oleellisesti edustavaan rakoilleeseen kallioon, jolloin suoritettavista kokeista ja niiden vaikutusten monitoroinnista saadaan eniten kokeellista tutkimustulosta. Koekohteissa tehdään kallioperän rakenteelliseen ja hydrologiseen karakterisointiin tarvittavat geologiset, geohydrologiset ja geofysikaaliset kokeet ja mittaukset sekä kaivannon tiivistyskokeet ja jätteiden stabilointikokeet. Lisäksi toteutetaan alueellinen monitorointi- ja havainnointijärjestelmä pitkäaikaiskäyttämisen arvioimiseksi.

Ympäristövaikutusten luotettava arviointi edellyttää kalliorakenteen ja pohjavesisuhteiden, erityisesti suotovesien pitkäaikaispäästöjen ja niiden vaikutusalueen hallintaa. Tämä edellyttää koekohteiden kallioympäristön rakenteellista ja hydrologista mallintamista sekä tulosten validointia seurantamittausten perusteella. Kohteista laaditaan 3-ulotteiset rakenteelliset ja geohydrologiset mallit, joiden avulla määritellään kallion rikkonaisuusvyöhykkeet ja anisotrooppiset läpäisevyydet.

Kolmiulotteisen kalliorakenteen ja läpäisevyyden määrittäminen edellyttää totuttua tarkempaa ja luotettavampaa parametrimäärittystä. Tästä syystä normaalien kallioperätutkimusten lisäksi koekohteissa testataan täydentäviä ja uusia kalliotutkimusmenetelmiä, joilla pyritään hankkimaan kolmiulotteista lisätietoa kallion geohydrologisesta rakenteesta. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi:

- alueellinen rakennegeologinen tulkinta
- geofysikaalinen kalliorakennetulkinta mukaan lukien kalliotutkatomografia
- porareian videokuva- ja digitaalikuvatulkinta rakotasojen ja -suuntien määrittämiseen sekä kallion läpäisevyyden arviointiin.
- täyden mittakaavan läpäisevyyskokeet, imeytys kaivannosta
- pinta- ja orsivesien vesitasotulkinta
- alueellinen pohjaveden virtaustulkinta
- läpäisevyyden alueelliset yhdenmukaisuus- ja variointitarkastelut

Erittäin keskeistä on asianmukaisen hydrologisen mittaus-, tulkinta- ja mallinnuskäytännön luominen. Tässä työvaiheessa määritellään tarkoituksenmukaiset mittausmenetelmät, mittausten lukumäärä, kokeiden mittakaava ja kesto erilaisissa rakoi- ja vedenjohtavuustilanteissa. Mallinnuksen tulostuksena saadaan alueelliset läpäisevyysarvot sekä tiiviysvaatimukset päästöjen vaikutusten minimoimiseksi. Kokeiden avulla tarkennetaan myös tutkimusmenetelmien sekä rakenne- ja geohydrologisten menetelmien tarkkuutta ja käyttökelpoisuutta saatujen mittaustulosten perusteella.

Toteutus: Kohdetutkimukset toteutetaan tutkimusyhteistyönä hankkeeseen osallistuvien organisaatioiden kesken pääsääntöisesti siten, että VTT vastaa tutkimusten ohjelmoinnista ja toteutuksesta mukaanlukien mittaustulosten käsittely. Yhteistyöorganisaatiot vastaavat koekohteiden rakentamisesta, instrumentoinnista sekä yleisimmistä mittauksista ja koejärjestelyistä erikseen laadittavien tutkimussuunnitelmien mukaisesti.

1.4 Jätekaivannon tekniset rakenneratkaisut ja niiden kustannukset

Tässä osatutkimuksessa kehitetään ja testataan kalliokaivannolle sellaiset rakenneratkaisut ja/tai tiivistysmenetelmät, joilla laatuvaatimusten mukaiset tiiviydet ja päästörajoitukset voidaan luotettavasti saavuttaa. Myöskin erilaisten rakenne- ja tiivistysratkaisujen kustannusvaikutukset analysoidaan tavoitteena kehittää kalliokaivannosta taloudellinen sijoitusratkaisu eri jättemateriaaleille.

Kalliokaivannon ympäristöpäästöt pohjaveteen voidaan hallita periaatteessa kolmella tavalla:

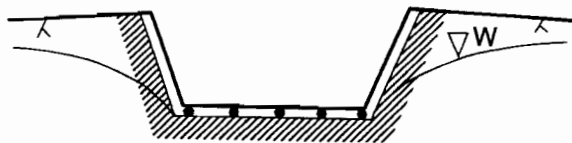
- 1) Kaivannon ympärille toteutetaan hydraulinen eristys pumppauksella, jolloin virtauksen suunta on aina ympäristöstä kaivantoon päin. Pumppauksella voidaan tarvittaessa toteuttaa myös vesiverho kaivannon ympärille.
- 2) Jätekaivantoa ympäröivä kallio tiivistetään siten, että läpäisevyysvaatimukset saavutetaan. Tiivistysmenetelmä ja mittaustapa on kehitettävä.
- 3) Kehitetään sellaisia rakenneratkaisuja, jotka sisältävät liukenemiseristeen tai -esteen sekä kuivatus- ja salaojitusrakenteet.



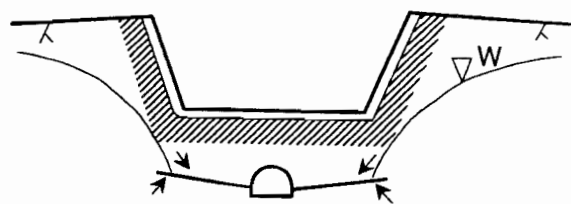
1a) Luonnontilainen kallio.
Vedenjohtavuus $k < 10^{-5} \dots 10^{-7} \text{ m/s}$



1b) Esi-injektoitu kallio
 $k < 10^{-7} \dots 10^{-9} \text{ m/s}$



1c) Esi-injektoitu kallio.
Suotovirtauksen pidätys kaivannon
tiivistys- ja salaojitusrakenteella
 $k < 10^{-9} \text{ m/s}$



1d) Esi-injektoitu kalliokaivanto.
Virtauksen säätely
tunneli-/porareikäjärjestelmästä

Kuva 1. Eräitä kalliokaivannon tiivistysmenetelmiä sekä niillä saavutettavia läpäisevyysarvoja, lähtökohtana luonnontilainen kallio.

Tutkitaan ja kehitetään kalliolle tyypillisiä erityisratkaisuja esim. tunnelien tai porareikien käyttöä kuivatus- ja salaojitusrakenteissa. Menetelmien vaikutusta simuloidaan edellisessä kohdassa kehitetyillä ja validoituilla malleilla.

Kuvassa 1 on esitetty eräitä kalliokaivannon tiivistysmenetelmiä sekä niillä saavutettavia läpäisevyysarvoja lähtökohtana luonnontilainen kallio. Kuvassa 1d) on esitetty eräs kallion tarjoama mahdollisuus suotovirtauksen hallitsemiseksi pumppauksella porareikäverkostosta joko kaivannon alta tai sivuilta.

Tutkimusalue 2: YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI- JA HALLINTAJÄRJESTELMÄ

2.1 Kalliokaatopaikan perustamiselle ja käytölle asetettavat vaatimukset

Määritetään kalliokaatopaikan perustamiselle ja käytölle asetettavat vaatimukset. Ne muodostavat lähtökohdan sijoitusalueen tutkimukselle sekä kaatopaikan teknisten ratkaisujen valinnalle. Tärkeän lähtökohdan muodostaa tiiviysvaatimusten määrittäminen luokituksen mukaisille jätehuollon kalliotiloille:

- yhdyskuntajätteen kaatopaikat
- teollisuusjätteen kaatopaikat
- erityiskaatopaikat
- jätehuollon prosessit

Uuden ympäristövaikutusten arviointia koskevan lain määräykset säätelevät mm. kalliorakenne- ja hydrogeologisen tutkimuksen tarkkuus- ja laatuvaatimuksia, joiden pohjalta kehitetään ympäristövaikutusten arviointijärjestelmä. Myös muut kalliokaatopaikkoja koskevat viranomaismääräykset ja asetukset selvitetään tässä lähtötilannetarkastelussa. Mahdollisen EY-integroitumisen vaikutukset Suomessa kaatopaikkojen rakentamista ja käyttöä koskeviin määräyksiin selvitetään.

2.2 Ympäristövaikutusten arviointijärjestelmä

Koekohteissa saatujen tulosten perusteella (kohdat 1.1 - 1.3) kehitetään sellainen kaatopaikan kallioympäristön seurantajärjestelmä ohjeineen, jota noudattamalla kalliokaatopaikan hydrologiaa ja mahdollisten pitkäaikaispäästöjen ympäristövaikutusta voidaan mitata ja arvioida. Tämä osa sisältää seuraavat tehtäväkokonaisuudet.

- Suoto-, valuma- ja pohjavesien hallintajärjestelmä
- Monitorointijärjestelmät
- Laskenta ja arviointimenetelmät

2.3 Ohjeet kalliokaatopaikan perustamisesta ja ympäristön hallinnasta

Hankeohjelman loppuvaiheessa on tavoitteena laatia kalliokaatopaikan käyttöohjeet. Ne antavat ympäristöviranomaisille periaatteet kalliokaatopaikan perustamis- ja rakentamedellytyksistä laatuvaatimuksineen sekä ohjeet ympäristövaikutusten arviointi- ja hallintamenettelystä.

Tutkimusalue 3: PROSESSOINTITEKNIIKAT JA -LAITTEET

Jätteen prosessointimenetelmistä ja kalliosijoituksen erityiskysymyksistä tulee käynnistää erillinen teollisuusvetoinen tuotekehityshanke, joka toimii kiinteässä yhteistyössä koekohteisiin liittyvän teknologia- ja ympäristötutkimuksen kanssa. Kalliokaatopaikka tarjoaa tilaisuuden suunnitella menetelmiä jäteprosessien optimoimiseksi ottamalla käyttöön huipputeknologiaa jätemassan ja ympäristön seurannassa ja ohjauksessa. Ruotsissa ja EY-maissa on suoritettu tutkimuksia yhdyskuntajätteen hajoamisesta eri olosuhteissa. Tässä tuote- ja laitekehitystutkimuksessa tutkitaan teollisuuden sivutuotteiden (mm. kipsi, tuhka, liete ym.) käsiteltävyyden parantamista, stabilointia, läjitettävyyttä jne. Yhdyskuntajätteen osalta tutkitaan mädätystä, kaasunkeruuta ja vesitaloutta (suotovesien kierrätys). Jättemateriaalien prosessointia varten tulee kehittää kallio käsittelyyn soveltuva modulaarinen sekoitinlaite.

5 TOTEUTUSAIKATAULU

Hankeohjelman toteutus kestää 4 v ja toteutuksen aikataulu esitetään liitteessä 1.

6 KUSTANNUKSET

Arvio hankeohjelman kokonaiskustannuksista tutkimusalueittain esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Hankeohjelman kokonaiskustannukset (milj.mk)

TUTKIMUSALUE	JULKINEN RAHOITUS	KUNTIEN JA TEOLLISUUDEN RAHOITUS	YHTEENSÄ
1. KOEKOHD- JA TEKNOLOGIATUTKIMUS Tutkimus ja tuotekehitys Koerakentaminen	3	0,5 1,5	3,5 1,5
2. YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI JA HALLINTA- MENETELMÄT	0,7	0,3	1
3. PROSESSI- JA LAITEKEHITYS	0,5	0,5	1
KOKONAISKUSTANNUKSET	4,2	2,8	7,0

6 RAHOITUSSUUNNITELMA

Hankeohjelman tutkimusalueista laaditaan tutkimusprojektit, joille haetaan rahoitusta eri lähteistä.

Potentiaalisia rahoituslähteitä ovat:

Julkinen rahoitus

Teknologian kehittämiskeskus, TEKES

Ympäristötutkimusta tukevat rahastot

EY:n ympäristöohjelmat

Muut kansainväliset ympäristönsuojelua tukevat rahastot

Teollisuuden panostus ja rahoitus

Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta (YTV)

Kaupungit: Espoo, Helsinki, Vantaa, Vaasa ym.

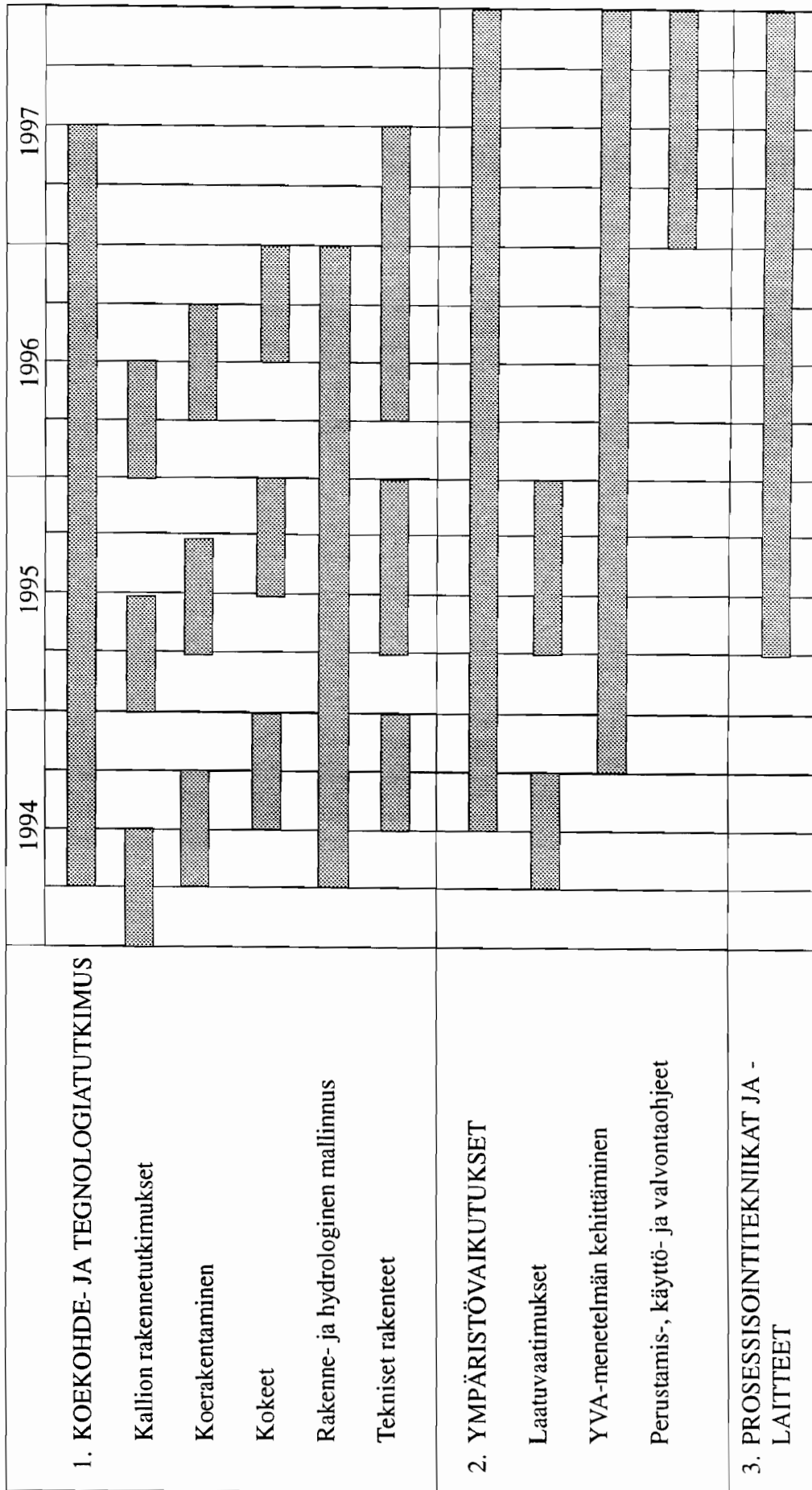
Teollisuuslaitokset ja kaivosyhtiöt

Laitevalmistajat

VIITTEET

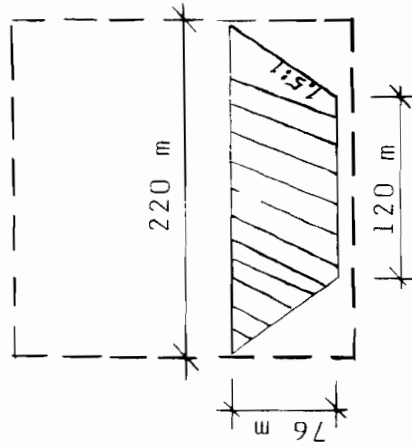
- 1 Saarelainen, S., Ylinen, A., Salo, M., Pöllä, J., Okko, O.
Kalliokaivannon käytön edellytykset jätehuollossa - Esitutkimus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Espoo 1993. 50 s.

HANKESUUNITELMA: KALLIOKAIVANTO JÄTEHUOLLOSSA AIKATAULU



JÄTEMÄKI KALLIOSSA

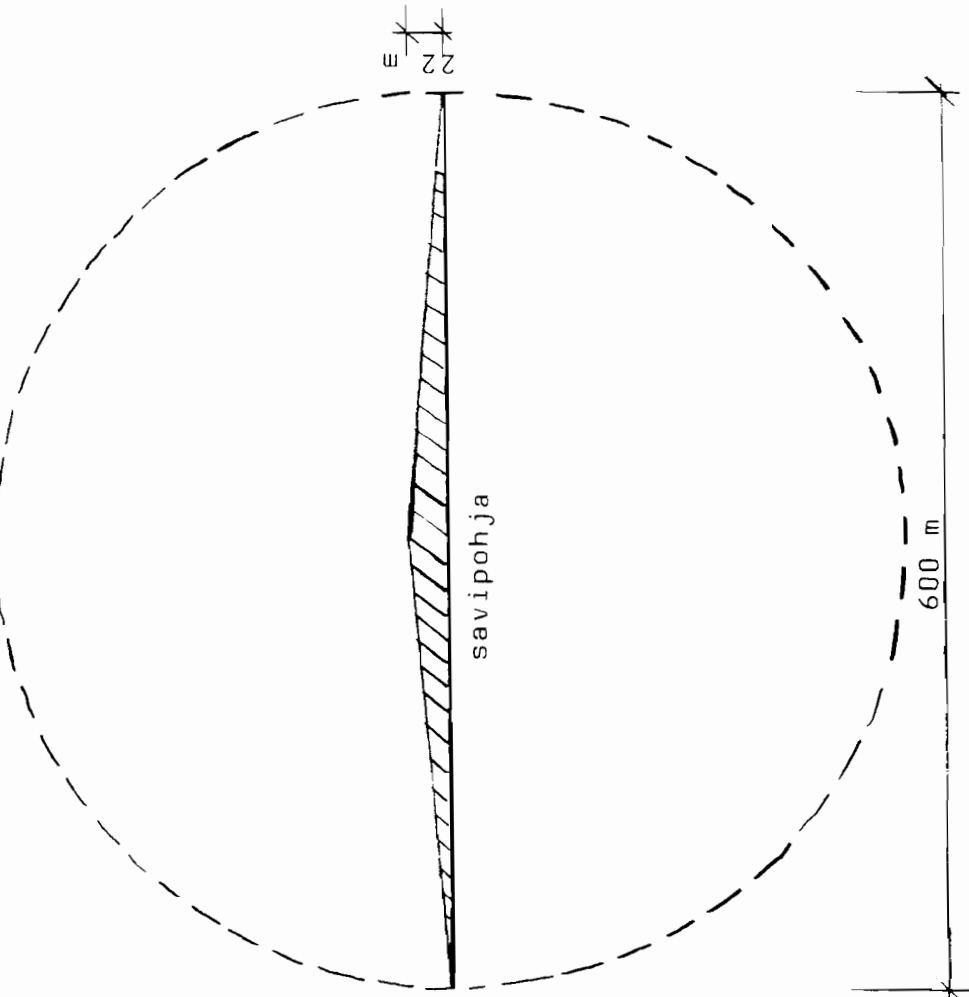
KAATOPAIKKA
- tilavuus 2 milj.m³
- pinta-ala alle 5 ha



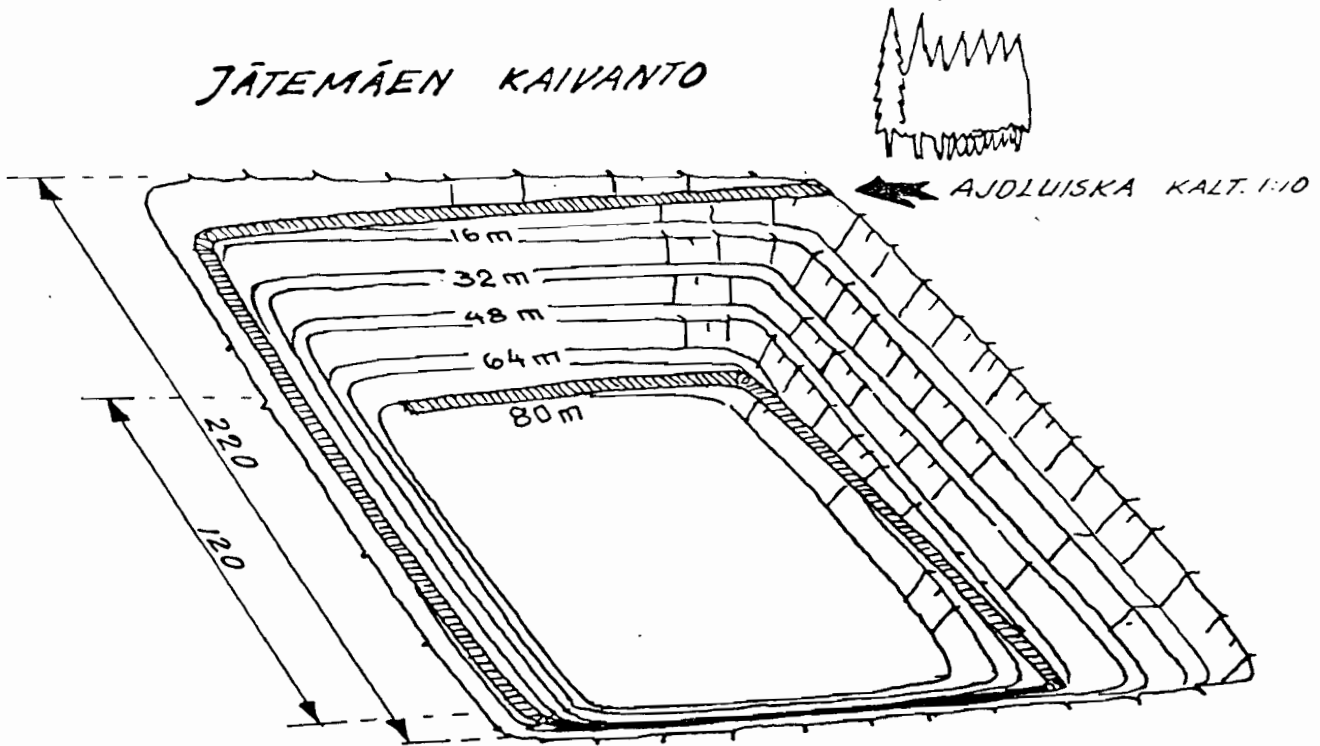
mittakaava 1:5000

JÄTEMÄKI MAANPÄÄLLÄ

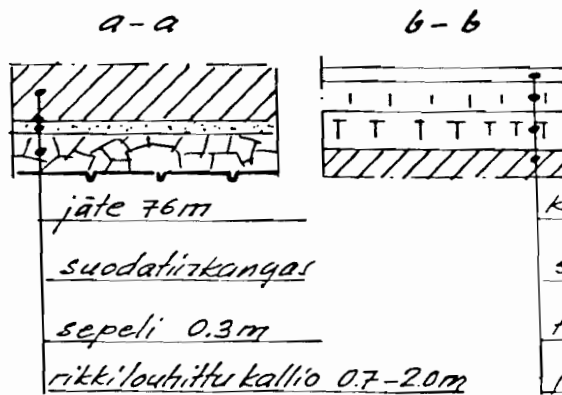
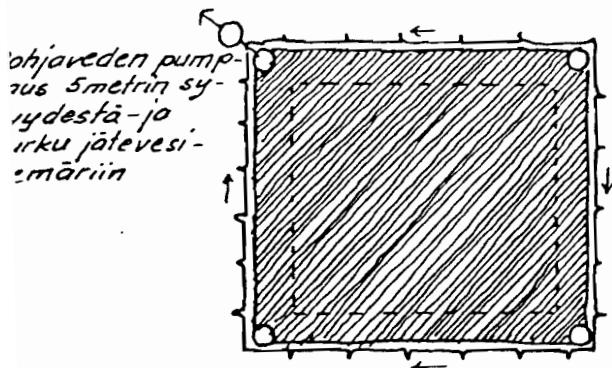
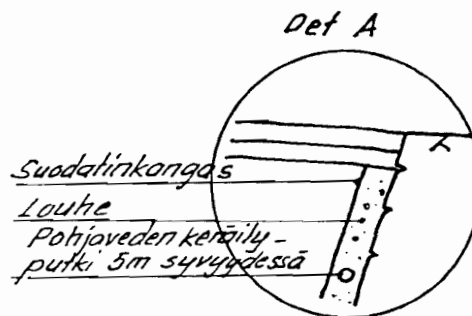
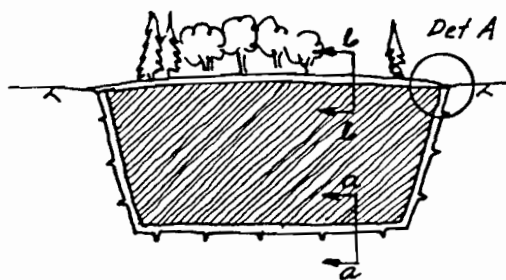
KAATOPAIKKA
- tilavuus 2 milj.m³
- pinta-ala 30 ha



JÄTEMÄEN KAIVANTO



JÄTEMÄKI TÄYTETTYNÄ



LIITE 1

Saarelainen, S., Ylinen, A., Salo, M., Pöllä, J., Okko, O.

**KALLIOKAIVANNON KÄYTÖN EDELLYTYKSET
JÄTEHUOLLOSSA - ESITUTKIMUS**

Lokakuu 1993



VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS
Tie-, geo-, ja liikennetekniikan laboratorio

Saarelainen, S., Ylinen, A., Salo, M., Pöllä, J., Okko, O.

Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus,
Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio
Lokakuu 1993

Kalliokaivannon käytön edellytykset jätehuollossa - esitutkimus

Tiivistelmä

Kalliokaatopaikka on kallioon rakennettu jätteiden loppusijoitustila. Maaperää pääsääntöisesti huomattavasti tiiviimpi kallio tarjoaa jätehuollon toiminnoille luonnollisen rakennusympäristön. Kallio on myös kestävä sijoituspaikka vaativien jätteenkäsittelylaitosten tai suurien täyttöjen rakentamiseen.

Kallioperä ei kuitenkaan ole täysin tiivis, vaan jätepäästöjen kulkeutumismahdollisuus pois kaatopaikasta on otettava sielläkin huomioon. Lainsäädäntöä kehitettäessä kaatopaikan alustamateriaalille ollaan asettamassa tiettyjä läpäisevyyskriteereitä, vaikka päästöjen määrä olisi konkreettisempi arviointiperuste. Kriteerien tarkastelua edellytetään lähitulevaisuudessa alkavassa ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä. Kalliokaatopaikan osalta se edellyttää kaatopaikkaan liittyvän kallioalueen hydrogeologista karakterisointia.

Kaatopaikkojen ympäristövaikutusten merkityksen lisääntyessä myös kalliokaatopaikan suunnittelussa on tulevaisuudessa otettava huomioon alustan hydrauliset ominaisuudet ja alueen pohjavesivirtaukset. Kaatopaikan päästöjä voidaan rajoittaa myös keinoitekoisella tiivistämisellä. Edelleen suunnittelijoiden pohdittavana on tapauskohtaisesti järjestää kaatopaikan vesienhallinta niin, että jätteenhoitokustannukset minimoituisivat. Tämä kaikki merkitsee myös louhintateknistä suunnittelua ja käytön ohjauksen sekä valvonnan instrumentointia.

Käsillä oleva tutkimus on esiselvitys kalliokaatopaikan suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvistä kysymyksistä. Käsittely on suuntaa antava. Raporttiin liittyy ehdotus tutkimusohjelmaksi, jonka tehtävänä on määritellä kalliokaatopaikan suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvät toimenpiteet. Raportin lopussa on esitelty joitakin konkreettisia kalliokaatopaikan rakennuskohteita ja niissä jo tehtyjä tutkimuksia.

Saarelainen, S., Ylinen, A., Salo, M., Pöllä, J., Okko, O.
Technical Research Centre of Finland,
Road, Traffic and Geotechnical Laboratory
October 1993

Qualifications for Rock Excavations in Waste Management - Initial Study

Abstract

Landfilling on bedrock has been proposed as an alternative for the conventional landfilling on ground consisting of mineral soils. As a matter of fact, a landfill on soil is always underlain by bedrock at close proximity in Finland. In these circumstances, some rock blasting is often necessary in the preparation of the landfill site.

The administrative standards set demand to control and minimize the environmental impact of the landfill on the water quality in the surroundings. Although there has been some talk about setting a limit for the allowed value of hydraulic conductivity, the bedrock medium is understood to behave beyond such argumentation; rather, the quantity of the net leakage should be estimated. For this reason, a description of the variation of hydraulic characteristics of the bedrock at and around the landfill is needed. On the other hand, it also makes it possible to select and apply, if necessary, proper remedial measures, e.g. linings or rock grouting to reduce the leakage.

The assessment of groundwater flow in bedrock is considered to be different from that in soils due to the fissured, anisotropic character of the rock. Comprehensive analytical flow models are still sparsely available. The numerical methods in the evaluation of the groundwater flow in the rock medium should be validated against in situ experiments. There is a number of techniques available to reduce the leakage from the landfill, but information on the feasibility and the quantitative effect of the methods is not available.

To illustrate the problems involved, investigations on actual landfill sites are described below. An in-depth research project on landfilling in bedrock and improving the assessment of the environmental impact is proposed.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
Abstract	3
Sisällysluettelo	4
1. Johdanto.....	6
1.1. Yleistä	6
1.2. Nykytila.....	7
1.3. Kaatopaikkojen suunnittelua koskevat ohjeet	7
1.4. Kalliokaivantojen saatavuus jätteensijoitukseen	9
1.5. Jätteiden ominaisuudet.....	10
2. Kaatopaikkojen ympäristövaikutusten hallinta.....	12
2.1. Kaatopaikan alusta.....	12
2.2. Kaatopaikan vesien kokoaminen ja käsittely	13
2.3. Kaatopaikan hoito ja jätteiden peittäminen.....	15
2.4. Kaatopaikkakaasujen keruu ja käsittely	15
2.5. Kaatopaikan nestetasapaino.....	18
2.6. Kaatopaikan ympäristövaikutusten minimointimahdollisuudet.....	20
3. Kalliokaatopaikan hydrogeologia - esitutkimukset	21
3.1. Yleistä	21
3.2. Hydrogeologian periaatteet	21
3.2.1. Epäpuhtauksien kulkeutuminen	21
3.2.2. Kalliokaatopaikan hydrogeologia.....	22
Alueellinen ulottuvuus	22
Pintavedet ja erilaiset pohjavedet	24
Erilliset vesitilat	24
3.3. Eri virtausväliaineille ominaiset vedenjohtavuusparametrit	26
Läpäisevyys	26
Vedenjohtavuus	26
Ominaisvarastokerroin	26
Huokoisuus	27
3.4. Rakenteellisia virtausparametreja	27
3.5. Virtausmallit.....	28
3.5.1. Alueellinen virtaus.....	28
3.5.2. Yleinen kaksikulotteinen virtaus	28
3.5.3. Stationäärinen l. ajasta riippumaton kaksikulotteinen virtaus	29
3.6. Pohjavesivirtausten suuruusjärjestys	30
3.7. Kallio-orsivedet ja lika-aineet	30
3.8. Kaatopaikan esitutkimukset	30
3.8.1. Alueellinen tutkimus.....	30
3.8.2. Kallion läpäisevyyden tutkiminen.....	31
3.8.3. Geofysiikaaliset maanpintamittausmenetelmät.....	31
3.8.4. Geofysiikaaliset reikämittausmenetelmät	32

Kivilajivaihtelua kuvaavat luotaukset.....	32
Vesipitoista rakoilua ja rikkonaisuusvyöhykkeitä kuvaavat luotaukset.....	33
Pohjaveden virtausta kuvaavat luotaukset.....	33
3.8.5. Kallion rakenteen tutkiminen.....	33
3.9. Kalliokaatopaikan hydrogeologian soveltaminen	34
3.9.1. Periaate.....	34
3.9.2. Alueellinen hydrogeologia.....	35
3.9.3. Kaatopaikan päästöjen rajoittaminen.....	35
3.9.4. Luonnollinen vuotovesitarkastelu	36
3.9.5. Vuotoesteen virtaamatarkastelu	41
4. Kallion tiivistäminen.....	42
4.1. Yleistä	42
4.2. Louhinnan vaikutus vedenläpäisevyyteen.....	42
4.3. Tiivistämistekniikat	44
4.4. Tavoitetiiviys.....	45
5. Suositukset jatkotutkimuksiksi	46
5.1. Taustaa	46
5.2. Tavoitteet.....	46
5.3. Tutkimuksen menetelmät.....	46
5.3.1. Koekaivantutkimus.....	46
5.3.2. Tunnelitutkimus.....	47
5.4. Tutkimuksen toteutus.....	48
5.5. Injektointitutkimus.....	48
Viitteet.....	49

1. Johdanto

1.1. Yleistä

Kalliokaatopaikka on kallioon louhittu jätteiden loppusijoitustila. Kun ympäristövaatimukset merkitsevät entistä tiukempaa päästöjen kontrollia, maaperää pääsääntöisesti huomattavasti tiiviimpi kalliopohja tarjoaa kaatopaikalle turvallisemman rakennusympäristön. Se merkitsee luontoon joutuvan jäteaineen vähenemistä.

Kallio on myös luja perusta rakentaa vaativia jätteenkäsittelylaitoksia ja suuria jätevuoria, joiden stabiilisuus perinteisissä kaatopaikkatoteutuksissa on jo ehtinyt muodostua ongelmaksi. Kalliolle sijoitettavan jätevuoren koolle ei ole olemassa pohjan stabiilisuuden kannalta mitään kokorajaa. Jätetilan louhinnassa on nähtävissä lisäksi taloudellisuus: siitä saadaan mursketta. Toisaalta on nähtävissä maisemansuojelu: louhinnassa syntyvä kuoppa saadaan täytetyksi.

Ympäristövaikutusten arviointimenettely merkitsee kaatopaikka-alueen ympäristön huomioimista kaatopaikan toiminnan kaikissa vaiheissa suunnittelusta kaatopaikan sulkemisen jälkeiseen aikaan. Kalliopohjavesien osalta se merkitsee kaatopaikkaan liittyvän kallioalueen hydrogeologista karakterisointia. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon alustan hydrauliset ominaisuudet ja alueen pohjavesivirtaukset. Kaatopaikan vuorovaikutus ympäristön pohjavesien kanssa on rajoitettava sellaiselle tasolle, että toisaalta jätteenhoitokustannukset kaatopaikkaanpäin pyrkivän veden osalta ja toisaalta jätepäästöt ympäristöön päin minimoituisivat. Tämä kaikki edellyttää myös huolellista louhintateknistä suunnittelua ja ohjauksen sekä valvonnan instrumentointia.

Käsillä oleva tutkimus on esiselvitys kalliokaatopaikan suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvistä kysymyksistä ottaen huomioon kaatopaikan ympäristövaikutukset. Tarkastelu on suuntaa antava. Raporttiin liittyy ehdotus tutkimusohjelmaksi, jonka tehtävänä on määritellä kalliokaatopaikan suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvät toimenpiteet. Raportin lopussa on esitelty joitakin konkreettisia kalliokaatopaikan rakennuskohteita ja niissä jo tehtyjä tutkimuksia. Jätteiden kallioon sijoitusta on käsitelty ulkomailla ainakin Saksassa sedimentoituneen, vedenjohtavuudeltaan homogeenisen kalliooperän osalta /23/. Verrattuna suomalaiseen kalliooperään, rakenteet poikkeavat toisistaan pohjavesi-ilmiöiden osalta.

1.2. Nykytila

Kaatopaikka on Suomessa yleisin jätteiden käsittelyn muoto. Suomessa vuosittain muodostuvan yhdyskuntajätteen määrä on arvioitu noin 2,5 milj. tonniksi. Määrästä noin 80 % käsitellään kaatopaikalla /1/. Suomessa on nykyisin käytössä noin 800 yleistä ja yksityistä kaatopaikkaa /2/.

Kaatopaikkakäsittely liittyy jossain vaiheessa kaikkiin nykyisiin jätteenkäsittelyn hyötykäyttö- ja käsittelyvaihtoehtoihin, vaikkakin joillakin menetelmillä voidaan kaatopaikoille joutuvan jätteen määrää vähentää merkittävästi. Perinteisesti Suomessa on ollut jokaisessa kunnassa vähintään yksi yhdyskuntajätteen kaatopaikka. Lisäksi teollisuudella on usein omat kaatopaikkansa tuotannon käytössä.

Lähiaikoina tullevat EY-direktiivin mukaiset säännökset koskemaan jätteiden käsittelyä myös Suomen kaatopaikoilla ETA-sopimuksen tultua voimaan. Todennäköisesti vain muutama nykyisin käytössä olevista kaatopaikoista täyttää nykyisellään tulevat määräykset esimerkiksi kaatopaikan rakenteiden tiiviyn ja jätteiden käsittelyn osalta. Tämä tulee vähentämään tulevaisuudessa jätteiden käsittelypaikkojen määrää ja edellyttää rakenteiltaan nykyistä parempien kaatopaikkojen rakentamista.

1.3. Kaatopaikkojen suunnittelua koskevat ohjeet

Kaatopaikkojen suunnittelua koskevia lakeja, asetuksia ja ohjeita on kirjattu muun muassa jätehuoltolakiin, vesilakiin, terveydenhoitolakiin sekä naapuruussuhdelakiin ja näihin liittyviin asetuksiin. Nykyinen jätehuoltolaki on peräisin vuodelta 1978. Kaatopaikkojen suunnittelua koskevat ohjeet on annettu pääosin 1980-luvun alkupuolella Sisäasiainministeriön toimesta. Jätehuoltolain ja -asetuksen uusimistyö on parhaillaan meneillään. Jätehuoltolain sisältöön tullevat vaikuttamaan myös valmisteilla olevat EY:n jätehuoltoa koskevat direktiivit, jotka koskevat myös kaatopaikkojen suunnittelua.

Jätehuoltolain 17§:n mukaan kunnan on huolehdittava jätteiden käsittelypaikkojen suunnittelusta, perustamisesta ja hoitamisesta asianmukaisesti. Lisäksi jätehuoltoasetuksen 7§:ssä säädetään, että yleinen kaatopaikka on suunniteltava, perustettava ja hoidettava siten, ettei siitä eikä sen liikenteestä aiheudu sanottavaa vaaraa tai merkityksellistä haittaa ympäristön asutukselle eikä pinta- tai pohjavesien pilaantumista, ympäristön roskaantumista tai huomattavaa maisemallista haittaa tai huomattavaa muuta haittaa ympäristölle. Lisäksi kaatopaikka on varustettava siten, että sen käyttö ja hoito voidaan järjestää asianmukaisella tavalla.

Sisäasiainministeriön ympäristönsuojeluosaston jätteidenkäsittelyä koskevissa ohjeissa annetaan seuraavia ohjeita kaatopaikka-alueen valinnalle /4/:

- Kaatopaikkaa ei saa perustaa pinta- tai pohjavedenottamon suoja-alueelle, tärkeälle pohjavesialueelle tai muullekaan vedenhankinnan kannalta käyttökelpoiselle pohjavesialueelle,
- kaatopaikkaa ei pidä perustaa vesistön välittömään läheisyyteen vesien pilaantumisvaaran takia,
- kaatopaikkaa ei saa perustaa alueelle, joka on altis tulvalle,
- kaatopaikkaa ei tule perustaa luonnonsuojelu- tai virkistysalueeksi varatulle alueelle eikä sen välittömään läheisyyteen,
- kaatopaikka tulee yleensä perustaa vettä mahdollisimman vähän läpäisevälle ja suhteellisen tasaiselle maaperälle,
- suon käyttö kaatopaikkana edellyttää, ettei kaatopaikka tulva-aikanakaan aiheuta pohja- tai pintavesien pilaantumista,
- kaatopaikka-alueen ulkopuoliset pintavedet tulee voida koota ja johtaa kaatopaikan ohi,
- kaatopaikan on sijaittava riittävän etäällä asutuksesta ja yleisesti käytetystä tiestä,
- maaston ja puuston tai muun kasvillisuuden tulee suojata ympäristöä niin, että kaatopaikan aiheuttamat maisema- ja hajuhaitat jäävät mahdollisimman vähäisiksi,
- kaatopaikan täyttämisen aiheutuvien maaston muutosten tulee sopeutua ympäröivään maisemaan.

Lisäksi saman ohjeen mukaan:

- kaatopaikka on yleensä mitoitettava siten, että sen käyttöaika on mahdollisimman pitkä, mieluiten yli 20 vuotta,
- alueen maapohjan on oltava suunniteltuun täyttökorkeuteen ja liikennöintiin nähdyn riittävän kantava,

sekä otettava huomioon:

- alueen sijainti jätteiden kuljetusten kannalta ja kulkuyhteydet,
- kuljetus- ja perustamiskustannukset,
- alueen myöhempi käyttötarkoitus,
- vaikutukset lähialueen käyttöön.

Tulevaisuudessa kaatopaikkojen sijoittamisessa ja niiden suunnittelussa tulee kaatopaikkojen ympäristövaikutusten arviointi olemaan keskeisiä tehtäviä. Kaatopaikan perustamishankkeisiin tullaan tällöin soveltamaan lakia ympäristövaikutusten arviointimenettelystä. Tällöin tullaan kiinnittämään erityistä huomiota siihen, ettei kaatopaikasta aiheudu haittaa tai vaaraa terveydelle eikä maaperän saastumista tai vesien pilaantumista.

Ehdotettu EY:n kaatopaikkadirektiivi /5/ periaatteessa yhdenmukaistaa kaatopaikkojen teknisen vaatimustason ja näin rajaa siitä aiheutuvat ympäristövaikutukset. Direktiivi sisältää myös runsaasti jätteenkäsittelyn kustannusten laskentaan ja käsittelystä perittävien maksuihin liittyviä ohjeita. Myös kaatopaikan jälkihoidosta aiheutuviin kustannuksiin tulee varautua. Direktiivin mukaisesti jätteiden käsittelyn kustannukset tulee hinnoitella täysimääräisesti ja periä ne jätteiden tuottajilta.

Kaatopaikan kustannuksina tulee huomioida /5/:

- alueen maan hinta
- suunnittelu- ja hallintokulut
- rahoituskustannukset
- kaatopaikan rakennuskustannukset
- käyttö- ja huoltokustannukset
- hoito- ja kunnostuskustannukset
- valvonta- ja tarkkailukustannukset
- sulkemis- ja jälkihoitokustannukset
- osallistuminen kaatopaikkojen jälkihoitorahastoon

1.4. Kalliokaivantojen saatavuus jätteensijoitukseen

Kalliokaivantojen saatavuudesta jätehuollon tarpeisiin tulee huolehtia kaavoituksessa. Kaatopaikan alueen valinnassa on kaavoituksellisin keinoin huolehdittava riittävästä suojaetäisyyksistä ja kaatopaikan ympäristövaikutusten minimoinnista.

Kalliokaatopaikan vaikutukset maisemaan ovat melko vähäiset, mikäli täyttö jätetään alkuperäisen maanpinnan tasolle. Kalliokaatopaikan tarvitsema alue voi eräissä tapauksissa jäädä huomattavasti pienemmäksi perinteiseen saman jätetilavuuden omaavaan kaatopaikkaan nähden, koska kalliokaivannossa jätepenkereen vakavuus ei aseta teknisiä rajoituksia penkereen paksuudelle ja luiskakaltevuudelle.

Reaktorityyppinen kalliokaivantoon sijoitettu jätteenkäsittelylaitos ja eräissä tapauksissa kalliokaivantoon sijoitettu kaatopaikka voidaan sijoittaa teknisesti korkeatasoisena ja ympäristövaikutuksiltaan vähäisenä esimerkiksi teollisuusalueen tai jätteen muodostumispaikan välittömään läheisyyteen, jolloin kuljetusten ja hoidon kustannukset jäävät mahdollisimman pieniksi.

Mahdollisia kaatopaikkojen sijoituspaikkoja ovat käytöstä poistetut kaivokset, lähinnä avolouhokset. Maanalaisiin kaivoskäytäviin on mahdollista sijoittaa erityisjätteitä, mikäli ne täyttävät tai ne voidaan rakenteellisesti ja kaavamuutoksilla saada täyttämään edellä mainitut suoja-alueita ja ympäristövaikutusten minimointia koskevat ehdot. Lopetettujen kaivosten käyttämisestä kaatopaikkana on esimerkkejä olemassa mm. Keski-Euroopasta.

Varsinkin Etelä-Suomessa on rakentamiseen kelpaavista luonnon kiviaineksista pulaa. Näin ollen kalliokaivannon rakentamisessa saatavalla louheella on yleensä kysyntää. Louheen myynnistä on saatavissa hinta, joka ainakin osin kattaa kaatopaikan alueen ja rakentamisen kustannuksia.

1.5. Jätteiden ominaisuudet

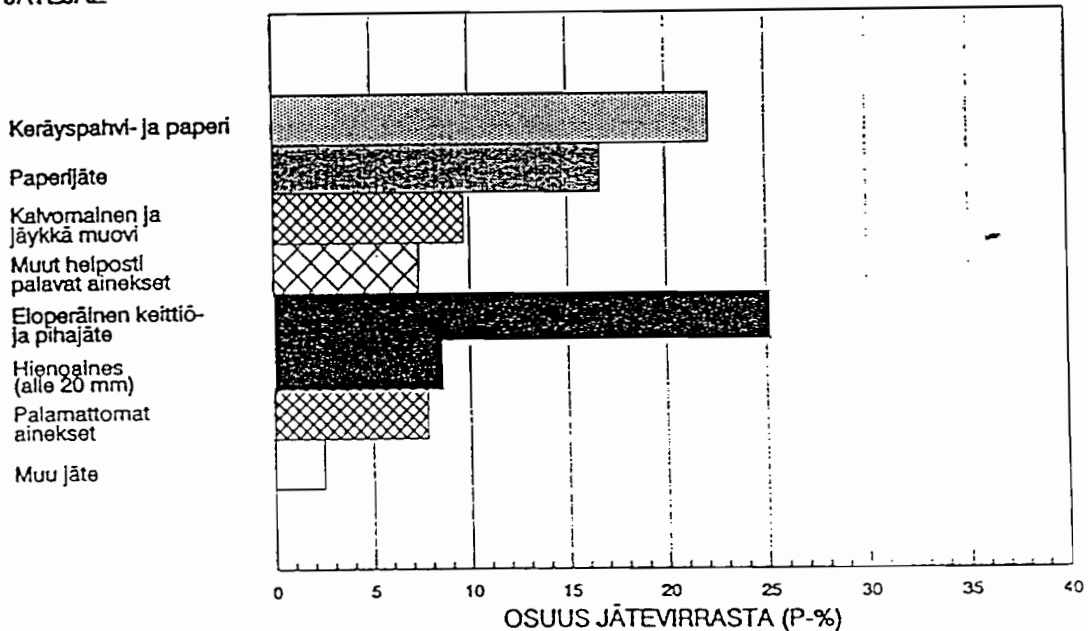
Jätteet voidaan syntypaikkansa perusteella jakaa kolmeen luokkaan:

- Yhdyskuntajäte
- Teollisuusjäte
- Erityisjäte

Yhdyskuntajäte voidaan edelleen jakaa talousjätteeseen, kaupan ja toimistojen jätteeseen, pienteollisuusjätteeseen ja rakennustoiminnan jätteeseen.

Pääkaupunkiseudulla suoritetussa tutkimuksessa /3/ arvioitiin Ämmäsuon kaatopaikalle käsiteltävän jätteen koostumuksestaan vastaavan vuonna 1990 kuvassa 1 esitettyä koostumuksen paino-% - jakaumaa.

JÄTEJAE



Kuva 1.1. Kaatopaikalle vastaanotetun yhdyskuntajätteen koostumus pääkaupunkiseudulla 1990.

Yhdyskuntajätteen käsittelyssä ongelmia aiheuttaa jätteen epähomogeenisuudesta. Jätteen biologisesti hajoava osa on yleensä nopeasti hajoavaa. Anaerobisessa hajoamisessa tuloksena on kaasuja ja orgaanisia yhdisteitä, jotka eräissä tapauksissa saattavat muodostua ympäristön kannalta hankaliksi. Jäte sisältää myös lukuisia hitaasti hajoavia jakeita, jotka kaatopaikan anaerobisissa olosuhteissa saattavat muodostaa varsin ongelmallisia yhdisteitä.

Teollisuusjätteet ovat nimensä mukaisesti sellaista teollisuudessa tai palvelutoiminnassa muodostuvaa jätettä, joiden erityisominaisuudet tai suuri määrä saattavat edellyttää erityisiä käsittelyolosuhteita. Useissa tapauksissa teollisuuden koostumukseltaan yhdyskuntajätettä vastaava jäteaine voidaan käsitellä yhdyskuntajätteen yhteydessä, jos määrät ovat vähäisiä. Teollisuusjätteet voivat sisältää erityisiä, ongelmajäteasetuksessa mainittuja ongelmajätteitä, jotka muuttavat jätteen luonteeltaan ongelmajätteiksi ja edellyttävät tämän mukaista käsittelyä.

Teollisuuden jätteet voivat eräissä tapauksissa olla myös vaarattomia, inerttejä jätteitä, joiden kaatopaikkakäsittelyssä ei tapahdu merkittäviä fysikaalisia tai kemiallisia muutoksia, ja joiden ei arvioida olevan haitallisia terveydelle tai ympäristölle.

Erityisjätteitä ovat edellä mainitut ongelmajätteet, teollisuuden ja yhdyskuntien lietteet, romuajoneuvot sekä muut erityistä käsittelyä edellyttävät jätteet. Ongelmajätteiden käsittely on lain mukaisesti luvanvaraista.

Teollisuus- ja erityisjätteiden koostumus ja käsittelytarve vaihtelevat tapauskohtaisesti teollisuuden alasta ja jätteiden syntytavasta riippuen. Eräissä tapauksissa teollisuusjätteen käsittelyn kannalta tarkoituksenmukaista sijoittaa erityiskaatopaikalle, joka on tarkoitettu etupäässä yhden jätelajin käsittelyyn (mono-landfill).

Maamassat sekä tie-, katu- tai piha-alueelta aurattu lumi eivät ole varsinaisia jätteitä, mutta esimerkiksi lumen käsittely vaatii usein sen määrän ja lumen sisältämien lika-aineiden koostumuksen takia erityistä käsittelyä.

Kaatopaikat voidaan sijoitettavan jätteen laadun mukaan jakaa neljään luokkaan:

1. Vaarattoman (inertin) jätteen kaatopaikka
2. Yhdyskunta- ja/tai teollisuusjätteen kaatopaikka
3. Ongelmajätteen kaatopaikka
4. Erityiskaatopaikka

2. Kaatopaikkojen ympäristövaikutusten hallinta

2.1. Kaatopaikan alusta

Kaatopaikoille asetettujen lakien ja säännösten mukaisesti valitaan teknilliset ratkaisut, joilla kaatopaikkojen ympäristövaikutuksia voidaan kontrolloida ja mahdolliset haitat saada minimoitua.

Kaatopaikka tulee perustaa mahdollisimman tiiviille maapohjalle, jotta päästöt pohjavesiin voidaan välttää. Alueen tulisi lisäksi olla mahdollisimman tasainen ja kantava, jotta alueen käyttö ja hoito on mahdollinen ja maapohjan vakavuus riittää kantamaan jätetäytöstä aiheutuvan kuormituksen eikä sortuman vaaraa ole.

Ehdotetussa EY-direktiivissä annetaan vedenjohtavuuden maksimiarvo kaatopaikan maapohjalle. Direktiivin mukaan kaatopaikan maapohjan tulee täyttää vedenjohtavuuden maksimiarvo kaatopaikan alaisen kolmen metrin maakerroksen osalta vedellä kyllästettynä.

Kaatopaikan pohjan vedenjohtavuuden maksimiarvoiksi on esitetty:

- teollisuus- ja ongelmajätteen kaatopaikoille, $K=10^{-9}$ m/s,
- yhdyksuntajätteen kaatopaikoille, $K=10^{-8}$ m/s,
- haitattoman jätteen kaatopaikoille (inerti jäte) vedenjohtavuudelle ei ole esitetty raja-arvoa.

Mikäli pohjan tiiviys ei luonnostaan täytä asetettuja tiiviysvaatimuksia, on kaatopaikalle rakennettava eristyskerros.

Luonnostaan Suomen maapohjat eivät eräitä savialueita lukuun ottamatta täytä vedenjohtavuudelle asetettuja tiukkoja vaatimuksia. Suomalaisten moreenimaalajien vedenjohtavuus vaihtelee välillä 10^{-6} ... 10^{-8} m/s ja kuivakuorisavien vedenjohtavuus välillä 10^{-5} ... 10^{-8} m/s muun muassa saven rakoilusta riippuen. Maapohjaisilla kaatopaikoilla pohjaveden virtaus on kuitenkin yleensä määritettävissä kohtuullisin keinoin.

Kallioperän vedenjohtavuus vaihtelee erittäin laajoissa rajoissa kallion rakojen tiheydestä ja laadusta riippuen. Ehjän kallion vedenjohtavuus vaihtelee välillä 10^{-12} ... 10^{-7} m/s, mutta esimerkiksi rakotihedden ollessa 1 rako/m, ja kun raon avauma on 1 mm, kasvaa vedenjohtavuus arvoon $K=10^{-3}$ m/s /6/. Kalliiossa veden virtaussuhteet ovat vaikeasti hallittavissa kallion rikkonaisuudesta johtuen. Myös virtausmatkat saattavat muodostua varsin pitkiä. Kalliopohjaveden valuma-alue ja purkautumissuhteet voivat poiketa maa- ja pintavesien valumasuhteista.

2.2. Kaatopaikan vesien kokoaminen ja käsittely

Kaatopaikan hoidon tavoitteena on vähentää kaatopaikalta valuvia vesiä ja parantaa niiden laatua. Kaatopaikan ulkopuoliset, puhtaat pintavedet kootaan niskaojiin. Kaatopaikan alueelta valuvat muut puhtaat vedet kootaan ja johdetaan erillään kaatopaikkavesistä kaatopaikan ulkopuolelle.

Mikäli kaatopaikan luonnollinen maa- tai kalliopohja ei täytä vedenjohtavuudelle asetettuja vaatimuksia, joudutaan alustalle rakentamaan sopivista maamateriaaleista tiivistyskerros. Erityistapauksissa voidaan joutua käyttämään myös tiivistyskalvoja tai tiiviistä savimateriaalista rakennettua eristyskerrosta. Kalliopohjaa voidaan tiivistää injektoinnilla.

Kaatopaikan tiivistyskerrosten paksuutta voidaan arvioida laskennallisesti tapauksissa, joissa sallittu suotovesimäärä voidaan määrittää /6/:

$$D = \frac{KhA}{Q},$$

jossa

D	tiivistyskerroksen paksuus (m)
A	pohjan pinta-ala (m ²)
h	veden painekorkeus täytteessä (m)
K	tiivistyskerroksen vedenjohtavuuskerroin (m/s)
Q	sallittu suotovesimäärä (m ³ /s)

Tiivistyskerroksen päälle rakennetaan salaojituskerros ja salaojaputkisto suotoveden keräämiseksi. Tapauksissa, joissa kaatopaikka on rakennettu luonnollisen maanpinnan alapuolelle, joudutaan kaatopaikan suotovedet pumpaamaan keruukaivoista, kuva 2.1.

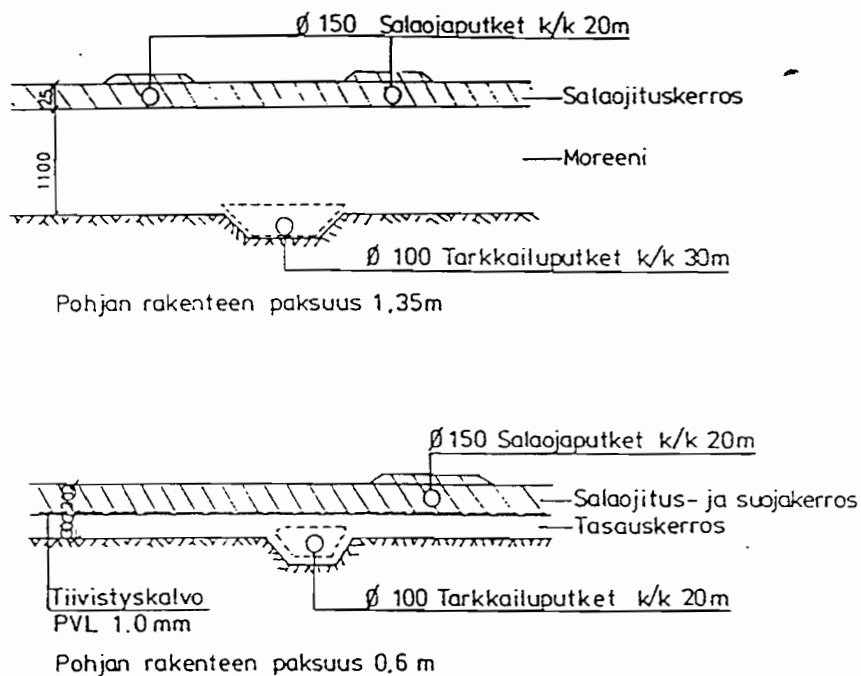
Likaantuneiden kaatopaikkavesien ja jätetäytöstä valuvien tai pumpattavien suotovesien määrä pyritään pitämään mahdollisimman vähäisenä, ja ne käsitellään tarvittaessa vaatimukset täyttäväksi joko erillisessä puhdistamossa tai vedet johdetaan jäteveden puhdistamolle.

Tyypillisesti yhdyskuntajätteen kaatopaikkojen vedet sisältävät runsaasti happea kuluttavaa orgaanista ainesta riippuen jätteessä olevasta orgaanisen aineksen määrästä ja hajoamisen tilasta. Kaatopaikkavedet sisältävät runsaasti typpeä, joka toimii rehevöittävänä kasvira-vinteena. Lisäksi kaatopaikkavesissä on jätteen laadusta riippuen runsaasti klorideja, metalleja ja muita ympäristölle haitallisia aineita. Kaatopaikkavesien tyypillisiä ominai-suuksia on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Kaatopaikkavesien perusominaisuuksia /7/.

Ominaisuus, yksikkö	Kunnalliset kaatopaikat					Teollisuuskaatopaikat				
	Min.	Med.	x	Max.	n	Min.	Med.	x	Max.	n
Lämpötila, °C	0,3	7,1	8,2	20	124	1,0	8,8	9,3	25	35
pH, yks.	2,8	7,0	¹	8,6	208	5,0	7,0	¹	8,7	67
Sähkönjoht., mS/m	4,6	180*	200*	820	203	5,6	96*	69*	580	65
Kiintoaine, mg/l	11	34*	39	130	8	3,7	15*	56	550	6
Cl ⁻ , mg/l	4,8	130*	220*	1800	141	4,0	40*	47*	270	40
Kokonaiskovuus, mmol/l	0,17	4,6*	4,3*	17,3	30	0,5	1,8*	2,1*	9,9	36
Rauta, mg/l	0,33	9,6*	26*	150	178	0,26	3,6*	8,9*	86	63
NH ₄ ⁺ -N, mg/l	0,001	14*	46*	340	153	0,008	7,4*	1,7*	9,8	36
COD _{Mn} , mg/l O ₂	5,0	45*	61	310	47	5,7	30*	40	120	15
COD _{Cr} , mg/l O ₂	40	200	400	2200	52	42	170	360	1300	16
TOC, mg/l C	0,04	90	180	590	26	27	50	62	140	8
BOD ₇ , mg/l O ₂	1,0	22	29	97	19	8,7	23	170	490	4
Fek. streptok., kpl/100 ml	0	16	135	65800	76	10	13	32	93	3
Termotoler. koliform., "	0	5	230	720000	65	2	13	34	150	4
Koliform., "	5	360	4600	17200	10	-	-	-	-	-

¹Muuttujan aritmeettinen keskiarvo ei ole järkevästi määriteltävissä.



Kuva 2.1. Kalliokaatopaikan eristys /6/.

Kaatopaikkojen suotovesien laatu riippuu paitsi jätteiden koostumuksesta myös kaatopaikan hajoamisprosessin vaiheesta sekä suotovesien virtauksesta maakerrosten läpi, jossa tapahtuu eräissä tapauksissa puhdistumista /8/. Käsittelyssä on saatu hyviä tuloksia kemiallisella käsittelyllä sekä jätevesien käsittelyllä yhdessä muiden jätevesien kanssa kunnallisessa puhdistamossa.

2.3. Kaatopaikan hoito ja jätteiden peittäminen

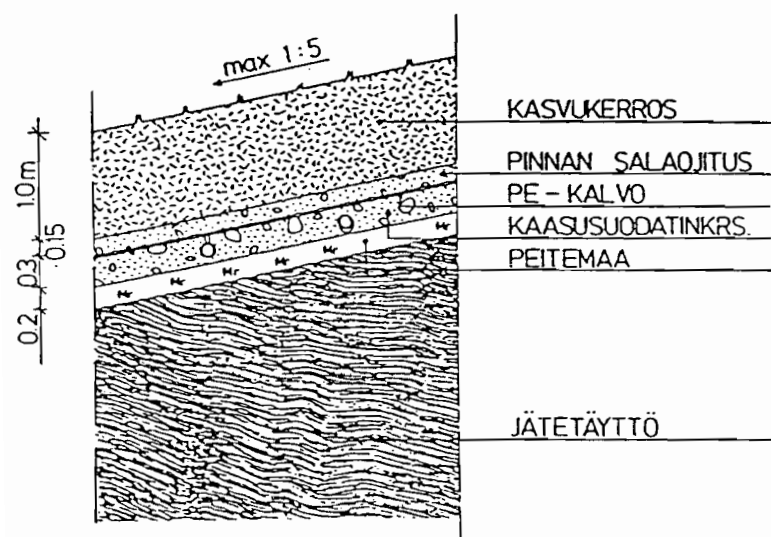
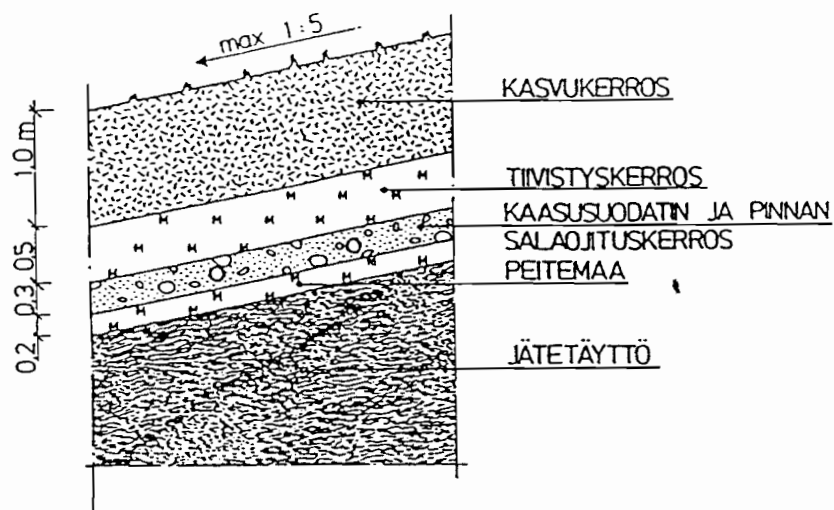
Yhdykuntajätteiden kaatopaikan hoitoon kuluu jätetäytön rakentaminen halutun rakenteen ja pinnanmuodon aikaansaamiseksi sekä jätteiden murskaaminen ja tiivistäminen jätteiden tilavuuden pienentämiseksi ja liikenteen mahdollistamiseksi. Tiivistämisellä ja täytön-aikaisella kaatopaikan peittämisellä pyritään myös täytönaikaiseen kaatopaikan pinta-valunnan hallitsemiseen ja suotovesien muodostumisen minimoimiseen. Täytön aikana voidaan myös rakentaa jätetäytön välikerroksiin suodatuskerroksia ja salaoja- ja kaasunkeruuputkistoja jätetäytön vesi- ja kaasutalouden hallitsemiseksi ja hajoamisprosessin nopeuttamiseksi.

Teollisuus- ja erityisjätteiden kaatopaikoilla täytönaikainen tiivistämistarve riippuu jätteen ominaisuuksista. Eräissä tapauksissa joudutaan kaatopaikan liikennettä varten perustamaan erityiset tiet jätetäytön päälle.

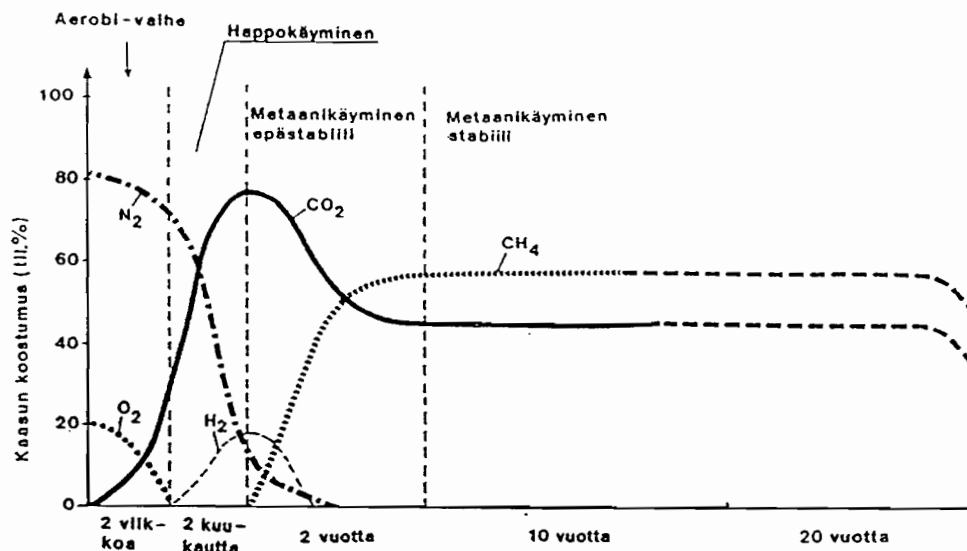
Kaatopaikan saavutettua lopullisen korkeuden tulee jätetäyttö peittää maakerroksilla kaatopaikan vesi- ja kaasutalouden hallitsemiseksi. Peitemaakerroksen päälle levitetään suodatinsorakerros, johon asennetaan kaasunkeruuputkisto jätetäytössä muodostuvan biokaasun keräämiseksi. Suodatinkerroksen päälle rakennetaan varsinainen tiivistyskerros sade- ja valumavesien jätetäyttöön imeytymisen estämiseksi esimerkiksi silttimoreenista. Erityis- ja ongelmajätteitä sisältävien kaatopaikkojen pintaeristyksessä voidaan joutua käyttämään synteettisiä tiivistyskalvoja, mikäli esimerkiksi veden joutuminen jätteeseen aiheuttaa erityistä vaaraa. Eristyskerroksen päälle rakennetaan viimeistelyvaiheessa kasvillisuuden kasvualusta: ohut suodatinkerros ja kasvukerros /6/.

2.4. Kaatopaikkakaasujen keruu ja käsittely

Hapettomissa olosuhteissa, orgaanisen aineen hajotessa biologisesti, syntyy kaatopaikkakaasua. Kaasun pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi. Biokaasu on vesihöyryllä kyllästettyä, ja se sisältää vähän typpeä ja happea kaatopaikan käymisvaiheesta riippuen. Kaatopaikkakaasussa on lisäksi pieninä pitoisuuksina muun muassa rikkivetyä, merkaptaaneja ja halogenoituja hiilivetyjä /9/.



Kuva 2.2. Kaatopaikan peiterakenteita /6/.



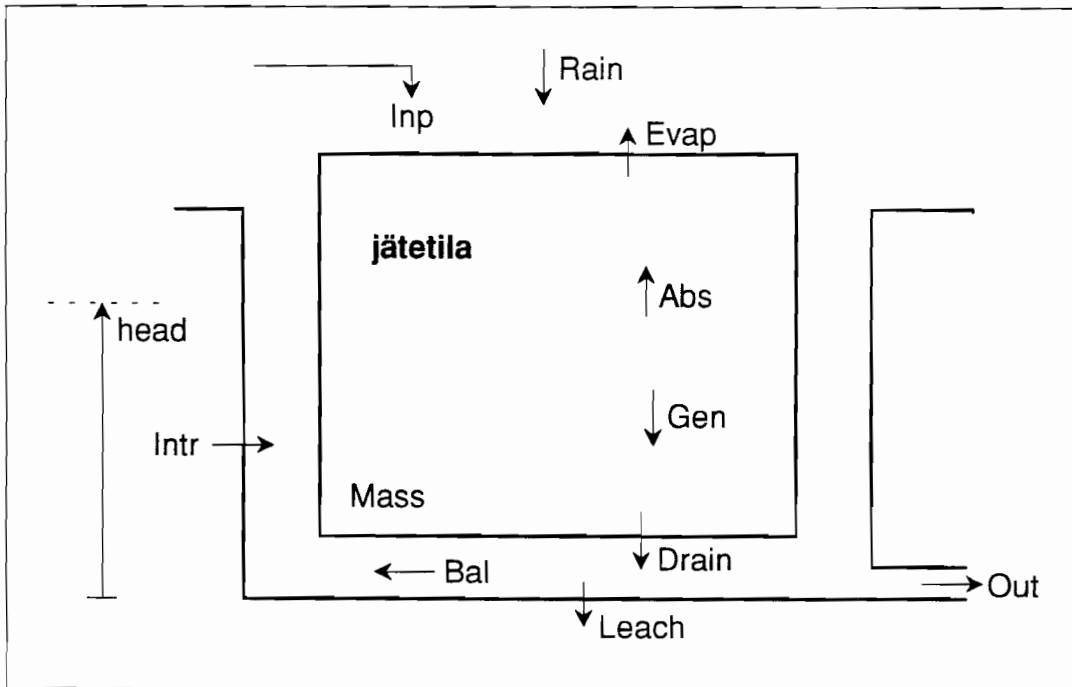
Kuva 2.3. Biokaasun muodostumisen eri vaiheet /9/.

Kaatopaikalla kaasu kerätään alipaineella kaatopaikan jätetäytöstä putkistoa pitkin kaasunkeruukaivoihin, joista se edelleen johdetaan hyötykäyttöön esimerkiksi energiantuotantoon. Kaasun keruujärjestelmä on kaatopaikoilla rakennettava kaatopaikan täyttövaiheessa. Tällöin rakennetaan kaasun keruuputkisto ja -kaivot. Jätetäytön väliin tulevien peitemaakerrosten tulee olla riittävän veden- ja kaasunläpäiseviä, jotta kaasun virtaus on mahdollista ja jätetäyttö voidaan pitää kosteana.

Kaatopaikkakaasun muodostusta voidaan yleensä voimistaa pitämällä jätetäytön kosteus metaanibakteerien kannalta optimaalisella alueella. Kosteutta voidaan lisätä kierrättämällä kaatopaikan suotovettä takaisin jätetäyttöön.

Kaatopaikkakaasun poistamisella jätetäytöstä on Vuosaaren kaatopaikalla tehdyssä kokeilussa havaittu olevan myönteistä vaikutusta kaatopaikan suotovesien laatuun. Suotovedessä olevat orgaaniset hapot ovat mahdollisesti osin muuttuneet biokaasuksi ja osin hapettuneet siten, että suotovesien biologinen ja kemiallinen hapenkulutus on vähentynyt ratkaisevasti jopa kolmannekseen tai sen alle /9/.

Saatujen kokemusten mukaan voidaan kaatopaikan kaasunmuodostusta voimistamalla kaatopaikan orgaanisten aineiden hajoamista nopeuttaa ja saada kaatopaikan tila nopeammin ympäristölle vähemmän haitalliseksi. Kaatopaikkakaasujen sisältämät terveydelle vaaralliset kaasut ja ympäristöhaittoja aiheuttavat hajut voidaan kaasun keruulla saada hallintaan. Kaasua voidaan käyttää energialähteenä. Kaasun käyttö energiantuotantoon saattaa kuitenkin edellyttää kaasun rikastamista ja puhdistusta suodattamalla tai pesulla, kaasun sisältämistä epäpuhtauksista, käytetystä polttotekniikasta ja mahdollisista polton päästörajoituksista riippuen /9/.



Kuva 2.4. Kaatopaikan nestetasapaino

2.5. Kaatopaikan nestetasapaino

Kuvassa 2.4. on esitetty periaatteellinen kaavio kalliokaatopaikan nestetasapainoon vaikuttavista tekijöistä. Ne ovat (massa-(M), aika-(T) ja pituusyksiköissä(L)):

<i>Inp</i>	kaatopaikkaan tuotavan nestemäisen jätteen määrä, M/T
<i>Rain</i>	kaatopaikkaa kuormittava sadanta, M/T
<i>Evap</i>	kaatopaikasta haihtuva nestemäärä, M/T
<i>Abs</i>	jätteeseen sitoutuva nestemäärä, M/T
<i>Gen</i>	jätteestä huuhtoutumisvesiin liukeneva kiinteän aineen määrä, M/T
<i>Drain</i>	jätteestä alustalle vuotava kokonaisnestemäärä, M/T
<i>Leach</i>	kaatopaikan päästöt kallioperään, M/T
<i>Intr</i>	kalliosta kaatopaikkaan tunkeutuva pohjavesi, M/T
<i>Bal</i>	kaatopaikan alustan nestekertymä, M/T
<i>Out</i>	käsittelyyn johdettava nestemäärä, M/T
<i>Mass</i>	kaatopaikan massa, M
<i>head</i>	ympäröivän kallion pohjaveden ylipaine, L

Tasapainoyhtälöt ovat mm:

$$Drain = Inp + Rain - Evap - Abs + Gen$$

$$Bal = Drain + Intr - Leach - Out$$

Tekijät eivät ole toisistaan muutenkaan riippumattomia. Esimerkiksi päästöt riippuvat alustan nestekertymästä, mutta päästöjä voi olla ilman kertymääkin. Siten seuraava on vain osaksi totta:

$$Leach = \begin{cases} k_L \cdot Bal, & Bal \geq 0 \\ 0, & Bal \leq 0 \end{cases}$$

Seuraavat riippuvuudet ovat myös vain suuntaa antavia (k_x on jokin vakioparametri):

$$Abs = k_A \cdot Inp$$

$$Intr = k_I \cdot head$$

$$Gen = k_G(t) \cdot Mass$$

$$k_G(t) = k_{G,1} \cdot \exp(-k_{G,2} \cdot t)$$

Tasapainon kannalta on oleellista, että kaatopaikan alustaan ei kerry nestettä, vaan kaikki neste tulee johdetuksi käsittelyyn. Se edellyttää, että $Bal=0$ (tai pienempi). Käsittelyä tarvitsee on tällöin pumpattava kaatopaikkanesteitä seuraavasti:

$$Out = Inp + Rain - Evap - Abs + Gen + Intr$$

Jotkin tekijöistä ovat erilailla aktiivisia eri olosuhteissa. Esimerkiksi sade- ja haihtumiskontribuutiot voidaan katsoa nolllaksi kaatopaikan sulkemisen jälkeen. Käsittelyä tarvitsee silloin seuraava määrä kaatopaikkanesteitä:

$$Out = Gen + Intr$$

EY:n ehdotetussa kaatopaikkadirektiivissä /5/ on myös käsitelty kaatopaikan nestetasapainoa, joskin osittain virheellisesti.

2.6. Kaatopaikan ympäristövaikutusten minimointimahdollisuudet

Kaatopaikan ympäristövaikutukset tulee minimoida ensi vaiheessa jo kaatopaikan sijoituspaikan valinnalla siten, ettei kaatopaikan toiminnoista aiheudu haittaa tai vaaraa ympäristön asukkaiden terveydelle eikä maaperän tai vesien saastumista. Myös kaatopaikan liikenteen järjestely mahdollisimman haitattomaksi tulee ottaa sijoituspaikan valinnassa huomioon.

Kaatopaikan rakenteilla voidaan saada pääosa päästöistä - suotovesistä ja kaasuista - hallintaan. Kaatopaikan prosessia voidaan hoitotekniikoilla ja teknisillä ratkaisulla ohjata ja säätää siten, että kaatopaikan prosessit tapahtuvat nopeammin, ja että jäte muuttuu ympäristön kannalta haitattomaan tilaan.

Kaatopaikan pohjan on oltava niin tiivis, ettei suotovesi missään olosuhteissa pääse vuotamaan pohjaveteen. Jätetäyttöön voidaan rakentaa pumppausjärjestelmä, jolla jätteen pohjaveden painekorkeus pidetään ympäröivän pohjaveden korkeutta alempana, jolloin vesien virtaus on hallittu ja kaatopaikkaan päin. Erityisesti kalliokaatopaikan reunat ja pohja on lisäksi tiivistettävissä vuotamisen vähentämiseksi, jos se katsotaan välttämättömäksi.

Kaatopaikan viimeistelyssä tulee kaatopaikan tyypistä riippuen valita täytön peittotekniikka. Tapauksissa, joissa kaasun muodostumista ei tapahdu, mutta haitallisten aineiden liukeneminen on mahdollista, tulee jätetäyttö peittää läpäisemättömällä kerroksella suotovesien muodostumisen minimoimiseksi. Kaatopaikan viimeistelyllä maisemallisesti siten, että se sopeutuu ympäristöön, on tärkeä merkitys. Kaivantoon tehdyn jätetäytön pinta-alan tarve on huomattavasti pienempi kuin perinteisen, maan päälle rakennetun jätepenkereen. Jätetäytön paksuus kaivannossa voi olla suuri lujuuden kärsimättä, eikä jätetäytössä ole luiskia. Erityisjätteitä voidaan tarvittaessa stabiloida parempien lujuusominaisuuksien saavuttamiseksi ja/tai liukenemisen vähentämiseksi.

3. Kalliokaatopaikan hydrogeologia - esitutkimukset

3.1. Yleistä

Tässä luvussa tarkastellaan kalliokaatopaikan ja kalliopohjaveden vuorovaikutusta ja siihen liittyviä ilmiöitä. Edelleen tarkastellaan sitä, kuinka kaatopaikan jäteaineiden pääsyä kaatopaikasta ympäristöön voidaan rajoittaa.

Jäteaineiden vuotamisen ja edelleen kulkeutumisen kannalta oleellisia asioita ovat kaatopaikkaa sivuava alueellinen pohjavesivirtaus ja sen vesipintakorkeus, kaatopaikassa olevan jäteaineen nestepintakorkeuden hallinta ja kaatopaikan ja ympäristön rajapinnan vuotavuus.

Nestevirtaus rajapinnan läpi on kaksisuuntainen. Toisaalta pyritään vähentämään jätevesivirtausta kalliokaatopaikasta ympäristön pohjavesiin, toisaalta pyritään vähentämään ympäristön pohjavesien virtausta kaatopaikkaan. Virtauksen suunta voi olla molempiakin yhtäaikaan, mutta useimmin suunta vaihtelee, mahdollisesti vuotuisten tai kaatopaikan operatiivisten seikkojen puitteissa.

3.2. Hydrogeologian periaatteet

3.2.1. Epäpuhtauksien kulkeutuminen

Jäteaineiden kulkeutuminen maa- ja kallioperässä liittyy pääsääntöisesti pohjaveden liikkeeseen. Veteen liuenneet jäteaineet kulkeutuvat pohjaveden mukana ominaispainosta riippumatta. Veteen vähän liukenevat aineet muodostavat liukenemattomalta osaltaan omat kulkeutumismekanisminsa. Pohjavedenpinnan yläpuolella kulkeutumisreunaehdon asettaa jäteaineen ominaispainon suhteessa ilman painoon. Ilmaa raskaampi jäteaine valuu alaspäin, ilmaa keveämpi nousee ylös /10,12/.

Pohjavedenpinnan alla jäteaineen painon suhteessa pohjaveden painoon ratkaisee, nouseeko jäteaine ylös vai valuuko se alaspäin. Mitä lähempänä jäteaineen paino on pohjaveden painoa, sitä kauemmin erottuminen kestää. Jäteaineen pohjavedestä erottumaton osa kulkeutuu pohjaveden mukana.

Jos pohjavettä kevyempi, veteen lähes liukenematon neste (LNAPL, Light Non-Aqueous Phase Liquid, esimerkiksi öljytuotteet, styreenit, jne.) ei ole kuitenkaan ilmaa kevyempää, se kerääntyy pohjaveden pinnalle. Sellainen kerääntymä pystyy yleensä ajelehtimaan pohjavesialtaassa 'alaspäin', pohjavedenpinnan mukana, jos pinta liikkuu. Se voi myös jäädä loukkuun maanalaiseen kupolirakenteeseen (orsivesi ylösalaisin), ellei kupoli pääse tyhjentymään pohjavedestä.

Jos kaatopaikassa on pohjavettä raskaampia, veteen lähes liukenemattomia nesteitä tai vapaasti kulkeutuvia vettä raskaampia kiinteitä partikkeleita (DNAPL, Dense Non-Aqueous Phase Liquid, esimerkiksi PCB, TCE, kreosootit, jne) eivätkä ne jostain syystä pääse enää valumaan alaspäin, ne kerääntyvät pohjavedenalaiseksi lammikoksi. Käytännössä sellaisia lammikoita muodostavat joko tiiviit savilinssit tai epätasainen kallionpinta. Jäteaine tunkeutuu myös saven ja kallion rakoihin tunkeutumisnopeuden riippuessa rakojen avaumasta.

Koska täysin veteen liukenemattomia aineita ei ole olemassa, myös 'liukenemattomat' faasit liukenevat aikaa myöten pohjaveteen. Siihen tarvittava aika saattaa olla kuitenkin niin pitkä, että voidaan puhua käytännössä liukenemattomuudesta.

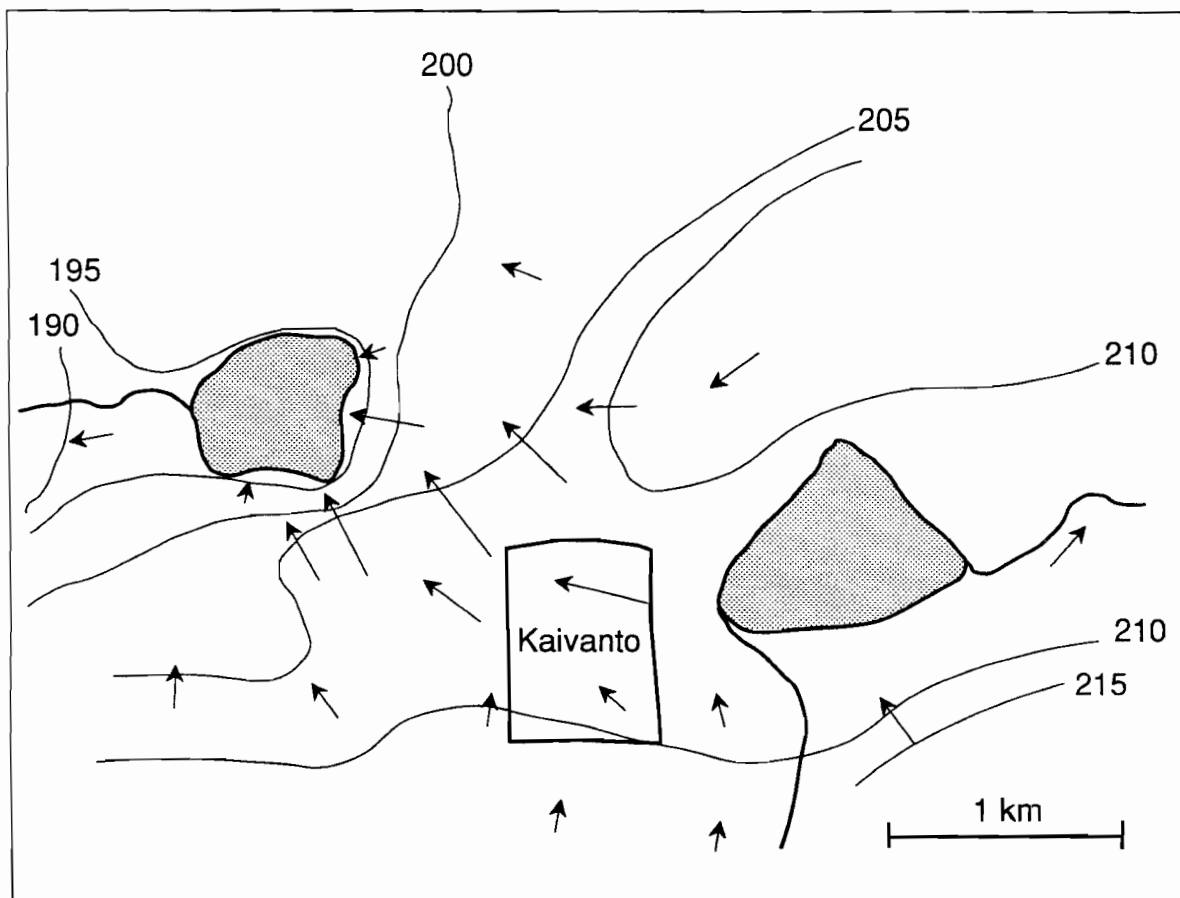
Maaperään joutuneen jäteaineen liukeneminen ei riipu yksin jäteaineen liukenevuudesta. Siihen tarvitaan myös kyllästämätöntä pohjavettä. Jos pohjavesi ei vaihdu, liukeneminen pysähtyy. Näin voi käydä huonosti vettä läpäisevissä maalajeissa ja kallioperässä.

3.2.2. Kalliokaatopaikan hydrogeologia

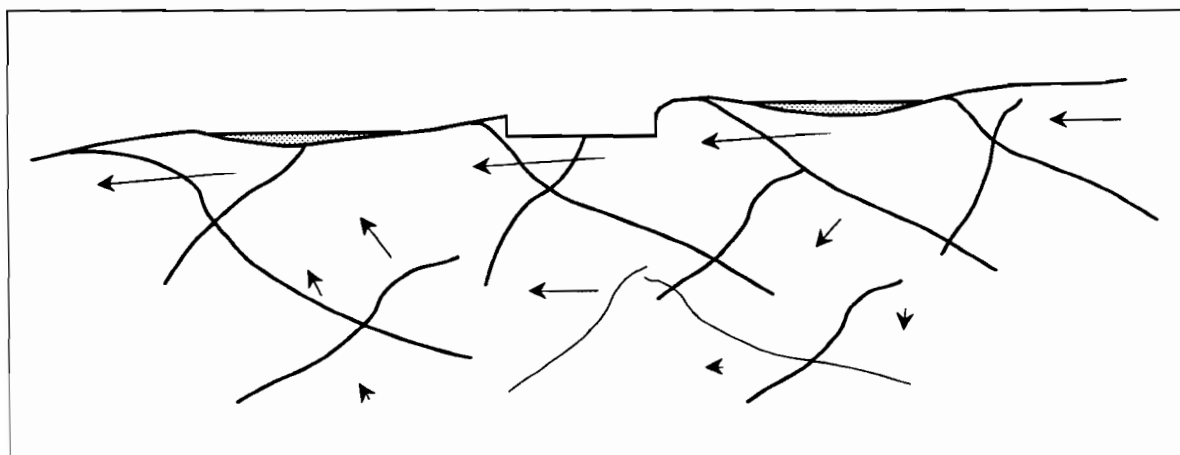
Alueellinen ulottuvuus

Kalliokaatopaikka liittyy alueelliseen hydrogeologiseen järjestelmään samalla tavalla kuin muutkin kaatopaikat. Kaatopaikan alapuolinen strata on kuvattu esimerkinomaisesti kuvassa 3.1a pystyleikkauksessa ja kuvassa 3.1b vaakaleikkauksessa välittömästi kaatopaikan alapuolisen stratan osalta. Erona tavanomaisiin kaatopaikkoihin on se, että käytännössä tarkastellaan vain yhtä hydrogeologista rakennetta, joskin rakenne saattaa yksittäistapauksissa olla hyvinkin heterogeeninen. Jos sellaisessa rakenteessa muodostuu eri syvyyksillä aivan erisuuntaisia pohjavirtauksia, olisi hyvä syy nimetä vastaavat piirteet kokonaan eri rakenteiksi. Tavanomainen maapohjainen kaatopaikka lisää em. geologiaan peruskallion yliset maakerrokset, Suomen oloissa monasti vain yhden pintamaalajikerroksen. Hydrogeologisesti yksikin sellainen lisäkerros on kuitenkin erittäin tärkeä. Koska sen kerroksen vedenjohtavuus on yleensä kertaluokkia suurempi kuin alisen kallioperän, voidaan alinen kallioperä silloin usein jättää huomiotta (mikä ei tarkoita sitä, etteikö kallioon kuitenkin tunkeutuisi jäteaineita, vaan sitä, että määrällisesti kalliossa kulkeutuvia aineita on olennaisesti vähemmän kuin ylisessä maaperässä).

Yleisessä tapauksessa ja yleisen mielenkiinnon kannalta kalliokaatopaikan alisten mahdollisten hydrogeologisten yksiköiden lukumäärä on epäoleellista. Niitä voidaan tarkastella yksityistapauksissa ja vain jos niistä on tarpeeksi tietoa. Vaikka sellaiset yksityiskohtaiset piirteet tunnettaisiinkin tarkkaan, silloinkin voitaisiin tarkastella keskimääräistä virtausta ja virtauksen pääsuuntaa alueen kallioperässä. Kaikissa tapauksissa tämä alueellinen kaatopaikan alinen virtaus voidaan selvittää sekä suuntansa että volyyminsä osalta hydraulisilla tutkimuksilla. Kuvissa 3.1a,b ko. esimerkkitapauksen pohjavirtaukset on merkitty nuolina nuolen pituuden ja suunnan kuvatessa virtauksen suuruutta ja suuntaa, kuvan tasossa.



Kuva 3.1a Kalliokaatopaikka-alueen vaakaleikkaus



Kuva 3.1b Kalliokaatopaikka-alueen pystyleikkaus

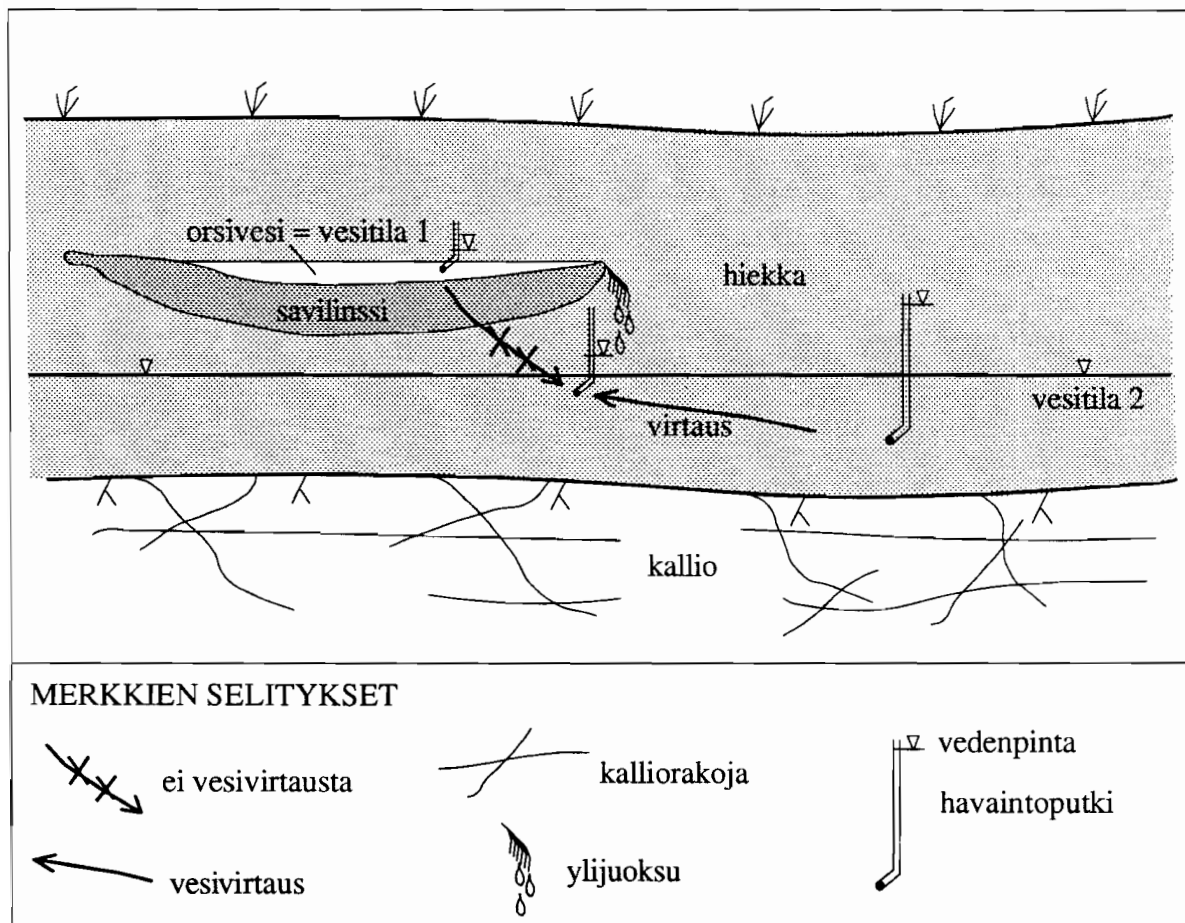
Pintavedet ja erilaiset pohjavedet

Lisäainekoostumukseltaan erilaisia vesiä voi olla maa- ja kallioperässä useanlaisia. Tässä kohdassa tarkastellaan kuitenkin ainoastaan vesitilojen yhtenäisyyttä (sana 'vesitila' on 3-ulotteinen vastine sanalle 'vesialue') kiinnittämättä huomiota yksittäisessä vesitilassa olevan pohjaveden sisäiseen koostumukseen.

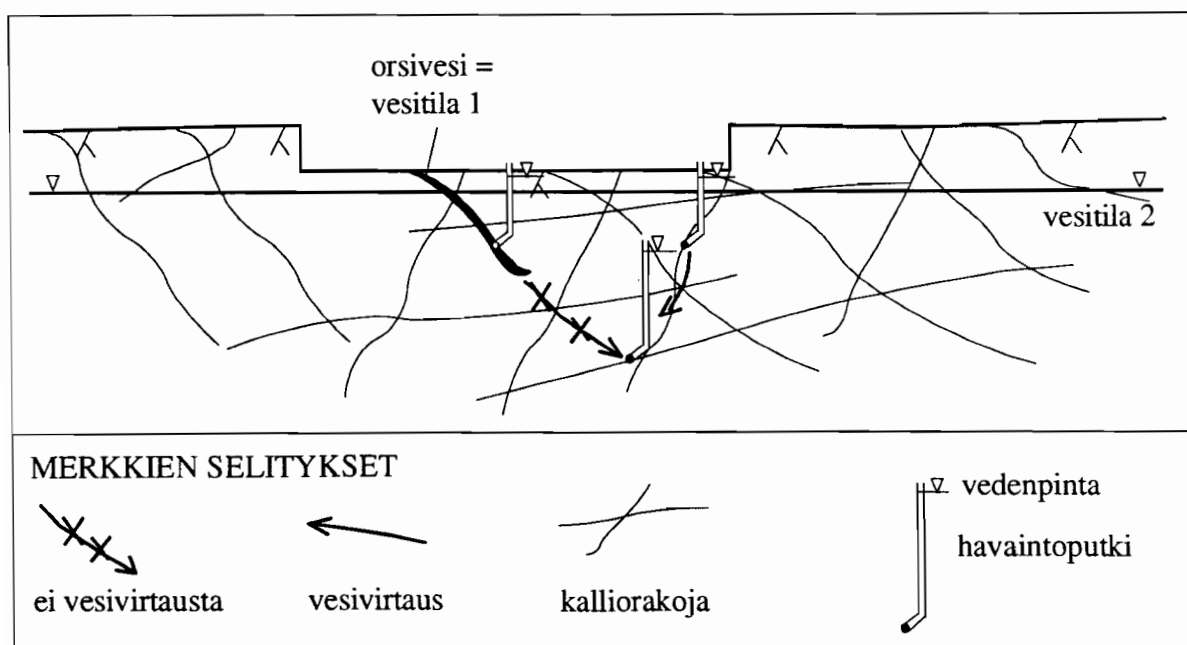
Erilliset vesitilat

Kaksi pistettä kuuluvat samaan vesitilaan, jos niiden välinen vedenpinnan korkeusero aiheuttaa virtauksen. Muussa tapauksessa pisteet kuuluvat eri vesitiloihin, kuva 3.2a. Kuvassa orsivedestä (vesitilasta 1) savilinssin läpi varsinaiseen yhtenäiseen pohjaveteen (vesitilaan 2) ei tapahdu virtausta, vaikka kapillaariputkessa näkyvä hydraulinen korkeus onkin orsivedessä korkeammalla, kun taas vesitilan 2 sisällä sellainen virtaus syntyy. On mahdollista, että jollakin alueella maa- ja kallioperä yhdessä pintavesien kanssa muodostavat yhden yhtenäisen vesitilan. Sellaisessa tapauksessa virtausten suuruudet ja suunnat eri syvyyksillä olisi mahdollista arvioida kohtalaisesti pintavesiä tarkkailemalla. Eri syvyyksillä virtausten suunnat ovat silloin pääpiirteittäin samat pintavesien suuntien kanssa. Virtausten suuruudet puolestaan pyrkivät noudattamaan samantapaista jakautumaa kuin pintavesissä. Virtausten suuruudessa (ja jossakin määrin myös suunnassa) on kuitenkin olennaisena piirteenä epähomogenisoituminen. Se on voimakkainta pintavesissä (vedet keskittyvät tiettyihin uomiin pääosan pinta-alasta ollessa vedetöntä), mutta sama ilmiö on olemassa myös maa- ja kallioperässä ('vesisuonet'). Kuitenkin lähes homogeenisia maanalaisia virtausvyöhykkeitäkin on olemassa, erityisesti hyvin vettäjohtavissa rakenteissa kuten sorakerrostumissa.

Kun vesitila on niin rajoitettu, että tarkastelualueella täytyy ottaa huomioon mahdollisuus vesitilan täyttymiseen, puhutaan erityisesti maanalaisesta vesialtaasta. Kun vesiallas tulee täyteen, se vuotaa yli ja vesi putoaa alaspäin maan vetovoiman vaikutuksesta suoraan vuotokohdan alla olevaan toiseen vesitilaan, kuva 3.2a. Sellaiselle 'vapaalle' pudotukselle pätee erityisesti, että gradientin suuruus on 1, kun muuten 'syöksyvirtauksessa' gradientin suuruus noudattaa yleisiä virtausperiaatteita. Kuvassa 3.2b sama ilmiö on esitetty kallioperäsovellutuksena. Kuvissa 3.2 orsivedestä (vesitilasta 1) virtausesteen läpi varsinaiseen yhtenäiseen pohjaveteen (vesitilaan 2) ei tapahdu virtausta, vaikka kapillaariputkessa näkyvä hydraulinen korkeus onkin orsivedessä suurempi, kun taas vesitilan 2 sisällä sellainen virtaus syntyy.



Kuva 3.2a Samaan ja eri vesitilaan kuuluvat pisteet.



Kuva 3.2b Kallio-orsivesi kallioperässä

3.3. Eri virtausväliaineille ominaiset vedenjohtavuusparametrit

Materiaalin pohjaveden käyttäytymiseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat vedenjohtavuus, ominaisvarastokerroin ja huokoisuus. Ne ovat käytännössä toisistaan riippumattomia suureita. Heterogeeniselle materiaalille ko. suureet määritellään periaatteessa pisteittäin. Tarkasteltaessa keskimääräisiä tai suuntaa-antavia ominaisuuksia riittää usein myös yhden tai muutaman homogeenisen väliaineen lähtökohta. Vedenjohtavuus voi lisäksi olla suuntautunutta (anisotrooppista), jolloin vedenjohtavuus ilmaistaan tensorina (6 riippumattonta komponenttia) skalaarin sijasta /10,11,12,13,14/.

Läpäisevyys

Läpäisevyys (permeability k , laatu m^2) on väliaineen rakenteellinen ominaisuus, joka kuvaa aineen huokostilan väljyyttä. Se ei riipu läpi virtaavan nesteen ominaisuuksista. Aineen läpi virtaavan nesteen määrä on suoraan verrannollinen aineen läpäisevyyteen.

Vedenjohtavuus

Vedenjohtavuus (hydraulic conductivity K , laatu m/s) määrää aineen läpi virtaavan veden määrän standardiolosuhteissa. Vedenjohtavuus on virtaavasta nesteestä riippuva (tiheys ja viskositeetti), ja se on suoraan verrannollinen aineen läpäisevyyteen k :

$$K = \frac{\rho g}{\mu} k$$

jossa ρ on virtaavan nesteen *tiheys* (laatu kg/m^3) ja μ on *dynaaminen viskositeetti* (laatu kg/ms). Tyypillisiä keskimääräisiä arvoja vedenjohtavuudelle ovat $10^{-12}..10^{-8}$ m/s vain nimellisesti rakoilleessa ('ehjässä') kalliassa, $10^{-8}..10^{-5}$ m/s vähemmän tai enemmän rakoilleessa kalliassa, $10^{-5}..10^{-3}$ m/s hiekassa ja sorassa.

Ominaisvarastokerroin

Ominaisvarastokerroin (specific storage S_s , laatu $1/m$) on aikaan liittyvä suure ja se määrää väliaineeseen paineen lisääntymisestä johtuvan veden kerääntymisen määrän. Ominaisvarastokertoimen arvolla on merkitystä vain silloin, kun paine on muuttumassa. Kalliokaivantoa ajatellen sellainen paineenmuutos aiheutuisi esimerkiksi kallion vedenpinnan muuttumisesta kaivauksen ym. järjestelyjen takia. Käytännössä parametrilla ei juurikaan ole merkitystä, koska odotettavat paineenmuutokset ovat vähäisiä. Ominaisvarastokertoimen arvo on luokkaa, $S_s = 10^{-6}..10^{-5}$ $1/m$.

Ominaisvarastokertoimella ei ole tekemistä kuivan väliaineen vettymisessä. Ominaisvarastokertoimella ei ole tekemistä minkään stationäärisen (steady state) tai lähes muuttumattoman prosessin kanssa. Useimmat luonnonolosuhteet kalliokaivannot mukaanlukien ovat käytännössä niin vakaita (muuttuessaankin vähintään hyvin hitaita), että niitä voi useimmiten pitää steady state prosesseina ilman merkittävää virhettä.

Huokoisuus

Huokoisuus (eli *kokonaishuokoisuus*, porosity n , laaduton) on veden täyttämän tilan osuus väliaineen kokonaistilavuudesta. Erikoisesti *virtaushuokoisuus* on em. huokoisuuden se osa, jossa virtausta tapahtuu, eli se on umpikujista riisuttu kokonaishuokoisuus. Koska maaperässä ei juuri ole umpikujia, ja kalliossakaan umpikujat, asennosta riippuen, eivät joko tyhjene tai täyty, voidaan umpikujat käytännössä jättää huomiotta ja puhua vain huokoisuudesta. Todetaan vain, että karkeasti maaperässä se tarkoittaa kokonaishuokoisuutta ja kallioperässä virtaushuokoisuutta.

Huokoisuus määrää aineeseen mahtuvan veden määrän. Se määrää myös aineen läpi virtaavan veden määrän sikäli, että huokoisuuden pienentyessä veden on kuljettava yhä keskitemmin, mikä pyrkii aiheuttamaan aineessa virtausta aiheuttavan gradientin suurenemista. Koska *virtausgradientti* (vektori i , laaduton) on kuitenkin monasti ulkoisten tekijöiden sanelema, loppuvaikutus onkin virtauksen pieneneminen. Teknisesti, *virtaustiheyden* (flow density, Darcy velocity q , laatu m/s) tultua mitatuksi mittarilla, huokoisuuden voidaan sanoa vaikuttavan veden *virtausnopeuteen* (flow velocity v , laatu m/s): mitä pienempi huokoisuus, sitä suurempi nopeus. Tällä tekijällä on merkitystä tarkasteltaessa, miten kauas lähtöpisteestä jotakin ehtii tietyssä ajassa.

$$v = \frac{q}{n}$$

Huokoisuus on tyypillisesti luokkaa $10^{-5}..10^{-3}$ kalliossa ja $10^{-3}..10^{-1}$ maassa. Savessa se lähenee jopa 0,5:ttä.

3.4. Rakenteellisia virtausparametreja

Tärkeimmät rakenteellisista virtausparametreista ovat *vedensiirtokyky* 1. *kuljettavuus* (transmissivity T , laatu m^2/s) ja *varastokerroin* (storativity S , laaduton), jotka määritellään tietyn paksuisille (L , laatu m) levymäisille rakenteille, jotka ovat periaatteessa ääretömän laajoja. Suureet saadaan vastaavasti vedenjohtavuudesta ja ominaisvarastokertoimesta kertomalla rakenteen paksuudella

$$T = K L$$

$$S = S_r L$$

Yksittäiselle raolle käytetään joskus parametria *avoimen raon vedenjohtavuus* (fracture hydraulic conductivity K_f , laatu m/s), mikä saadaan rakenteessa mitatusta vedensiirtokyvystä jakamalla raon *avaumalla* (aperture e , laatu m), kun oletetaan, että mittaus on kohdistunut yhteen ainoaan rakoon. Avoimen raon vedenjohtavuus voidaan laskea myös kaavasta /13/

$$K_f = \frac{\rho g e^2}{12\mu}$$

jossa ρ on virtaavan nesteen tiheys (laatu kg/m³) ja μ on dynaaminen viskositeetti (laatu kg/ms). Putkirakenteelle tärkeä rakenneparametri on *virtausvastus* (hydraulic resistance R , laatu s/m²), joka saadaan käänteislukuna *vedenjohtokyvystä* (hydraulic conductance G , laatu m²/s), joka puolestaan määritellään seuraavasti (A on virtausputken poikkipinta-ala ja l on putken pituus):

$$G = \frac{KA}{l}$$

3.5. Virtausmallit

3.5.1. Alueellinen virtaus

Alueellinen virtaus syntyy, kun alueen jokaisessa kohdassa vaikuttaa *virtausgradientti* (i , laaduton). Virtausgradientti saadaan (kolmiulotteisena) vektoriderivaattana *hydraulisesta korkeudesta* (kenttäsuure h , laatu m). Hydraulinen korkeus tarkoittaa sitä korkeutta, jolle vedenpinta nousee tarkkailupisteeseen asennetussa ohuessa, kapillaarittomassa havaintoputkessa. (Mukavuussyistä kaavassa käytetään miinusmerkkiä, mikä saa aikaan sen, että gradientti on samansuuntainen aiheuttamansa virtauksen kanssa.):

$$\vec{i} = -\nabla h$$

3.5.2. Yleinen kaksiulotteinen virtaus

Alueellista virtausta tarkasteltaessa virtausväliaine oletetaan jatkumoksi, eli virtausta tapahtuu kaikkialla, enemmän tai vähemmän. Useissa tapauksissa virtauskenttä voidaan olettaa kaksiulotteiseksi, mikä merkitsee sitä, että virtaus on kaikkialla horisontaalista. Vaikka näin asia ei luonnollisesti olekaan vaihtelevassa maastossa, ovat maastonmuodot kuitenkin useassa tapauksessa niin loivia, ettei siitä synny merkittävää virhettä alueellisessa tarkastelussa. Se merkitsee yleensä myös sitä, että kaikki virtaus tapahtuu peruskal-

lion yläpuolella. Kallioperässä tapahtuvat virtaukset on todettu useassa yhteydessä hyvin epäsäännöllisiksi. Niiden keskinkertaistamista voidaan harrastaa vain hyvin laajassa mit-takaavassa.

Paitsi maaston muodot, myös virtausväliaineen ominaisuuksien vaihtelu vaikuttaa vir-tauksen suunnan poikkeamiseen. Virtaus 'kiertää' huonosti läpäisevän maaston kohdan. Alueellisen tarkastelun ideana on kuitenkin ymmärtää alueen yleistä ja keskimääräistä virtauskäyttäytymistä, jolloin yksityiskohtaiset piirteet ohitetaan. Silloin on tehty yleistys myös virtausväliaineen ominaisuuksien osalta keskimääräistämällä ne. *Virtaustiheys* (flow density, Darcy velocity, myös virtausmäärä, vektorikenttä $\mathbf{q}$, laatu m/s) on virtaa-van veden määrä (m^3) sekunnissa sellaisen 1 m^2 :n tarkastelupinnan läpi, joka on kohti-suorassa virtausta vastaan. Se riippuu sekä vedenjohtavuudesta että gradientista:

$$\bar{\mathbf{q}} = \underline{\underline{K}}(x, y) \bar{\mathbf{i}}$$

Virtaama (flow rate, myös virtausvuo, laatu m^3/s) on edellisen kokooma tietyn pinnan läpi:

$$Q = \int \bar{\mathbf{q}} \cdot d\bar{\mathbf{A}}$$

Alueellisesti on myös mahdollista tarkastella kahden (tai useamman) kerroksen sys-teemiä. Silloin kukin kerros käsitellään erillisesti, gradientin ollessa kaikille yhteinen. Eri kerroksissa tapahtuva virtaus riippuu sitten kerrosten ominaisuuksista.

Usein jää epäselväksi, kumpi aiheuttaa kumman, gradientti virtauksen vaiko virtaus gra-dientin. Laskennallisesti sillä ei ole mitään merkitystä: kvantiteetti selviää yllä olevasta kaavasta molemmissa tapauksissa. Joitakin selviä perustapauksia on olemassa. Kahden vakiokorkeudessa olevan järven välisessä maastossa gradientti on vakio, jos maasto on tasalaatuista. Virtauksen voidaan silloin katsoa aiheutuvan vallitsevasta gradientista. Jos maasto on sitä vastoin heterogeenista, voidaan maastoon syntyvän epätasaisen gradientti-jakauman katsoa aiheutuvan epätasaisesta virtauskentästä (ja epätasaisista virtausväliaine-ominaisuuksista). Symbioosia kuvaa integroitu yhtälö

$$\nabla \cdot (\underline{\underline{K}}(x, y) \nabla h) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

3.5.3. Stationäärinen l. ajasta riippumaton kaksiulotteinen virtaus

Stationäärisessä (steady state) prosessissa yo. yhtälön oikea puoli=0. Kallioperässä tapah-tuvia virtauksia voidaan useasti tarkastella 'steady state' -tilassa (muuttumaton). Yleensä stationäärisen tilan tarkastelu on mahdotonta vain silloin, kun halutaan tietoa nimen-omaan kallioperään varastoituvan veden määrästä. Stationäärisyys merkitsee sitä, että virtauksen määrä ja suunta on kaikkialla muuttumaton. Se merkitsee myös, että systee-missä oleva vesimäärä on muuttumaton, eli että sisään menee yhtä paljon kuin tulee ulos.

Tämä johtaa käytännössä kahteen 'ikuisen' prosessiin, joista kulloinkin tilanteeseen paremmin sopivaa tarkastellaan:

1. Kuivan kauden mallissa virtausta ei ole joko a) ollenkaan (missä ei sen enempää ole tarkasteltavaa) tai b) jos ympäristössä on vakiopintaisia vesialueita, niin virtaus tapahtuu tasatahtia ylemmistä varastoista alempiin. Näissä skenarioissa järvien vedenpinta ei alene kuivana kautena.
2. Sadekauden mallissa edellisiin lisätään vakiosade, jolloin myös a)-tapaus saa sisältöä.

3.6. Pohjavesivirtausten suuruusjärjestys

Eri vesitilojen virtaukset voivat olla samantapaisia tai aivan erilaisia keskenään. Ainoa jossakin määrin yleinen kvantitatiivinen sääntö on, että vedenjohtavuudeltaan tasaisessa kerroksessa syvemmällä virtaus on pienempää. Se ei kuitenkaan päde aina. Kvalitatiivisesti vielä selvemmin voidaan sanoa, että pintavesien virtaukset ovat kertaluokkia suurempia kuin virtaukset maassa, jotka puolestaan ovat kertaluokkia suurempia kuin virtaukset kalliossa. Usein voidaankin tarkastella vain ylintä läsnäolevaa em. virtauksista ja jättää muut huomiotta, mutta se ei päde aina.

Vaikka ylin em. virtauksista dominoisikin volyymiltään, se ei merkitse sitä, etteikö muita olisi olemassa. Esimerkiksi lika-aine tunkeutuisi myös kallioon pienin määrin siinäkin tapauksessa, kun valtaosa siitä huuhtoutuisi pintavesien mukana.

3.7. Kallio-orsivedet ja lika-aineet

Erilliset vesitilat ovat tyypillisiä savikoissa ja tiiviissä moreeneissa, mutta myös kalliossa, varsinkin pintaosissa, on mahdollista olla erillisiä vesitiloja, kuva 3.2b. Sellaiset kallio-orsivedet ovat kuitenkin tilavuudeltaan pieniä verrattuna maaperässä tavattaviin orsivesiin. Kalliokaatopaikkaa ajatellen ne ovat kuitenkin lika-aineiden kertymispaikkoja, joihin saattaa kertyä jopa valtaosa lika-aineista.

3.8. Kaatopaikan esitutkimukset

3.8.1. Alueellinen tutkimus

Alueellinen tutkimus käsittää kaatopaikan ympärillä olevien vesipintojen ja -varastojen kartoittamisen eri vuodenaikoina. Vaikka avovesien pinnankorkeudet ovat melko vakiot, maapohjavedenpinta voi vaihdella useita metrejä sateiden mukaan. Pinnankorkeudet paljastavat alueellisen pohjaveden virtaussuunnan. Suunnassa voi olla paikallisesti huomattaviakin muutoksia vuodenaikojen ja sadantatilanteen mukaan.

3.8.2. Kallion läpäisevyyden tutkiminen

Kallion läpäisevyyteen vaikuttaa kallion rikkonaisuus ja rakoilu, rakotiheys ja rakojen laatu. Läpäisevyytutkimuksilla voidaan määrittää toisaalta luonnontilaisen kallion läpäisevyysominaisuuksia ja toisaalta arvioida mahdollista tiivistämistapaa ja tiivistämisen tulostavoitetta.

Läpäisevyyttä voidaan tutkia poranrei'issä tehtävin vedenläpäisevyyskokein. Läpäisevyyskokeet tehdä vesimenekkikokeina niin, että voidaan mitata veden imeytyminen pienillä virtausnopeuksilla ja pienillä paineilla. Vesimenekkikokeet tehdään sulkemalla reikä sekä ylä- että alapäästä tiivisteellä (pakkerilla, mansetilla). Jos ylätulppa on kallion pinnassa, ei paine saa ylittää kallion painoa, 0,2 bar, jotta mahdolliset vaakaraot eivät avautuisi. Muuten maksimipaineena voidaan käyttää vedenpainetta 0,4 bar. Vakiopainekoe voidaan tehdä myös alipaineisena, jolloin vedenpinta pidetään normaalin alapuolella. Vesimenekin mittausta tehdään vähintään 10 minuutin kuluttua ylipaineen asettamisesta, tai kun paine on vakiintunut. Paineen vakiintuminen saattaa kestää kauankin, koska sen vaikutuksen tulee levitä riittävästi ympäröivään kallioon. Kussakin asemassa tehdään vesimenekkimittaus kolmella paineen arvolla. Vesimenekkikokeen tulokset tulkitaan johtavuuksiksi ko. tulpapaväliä ja tulostetaan porausleikkauksissa (vrt. Ämmässuo, kohta 6.).

3.8.3. Geofysiikkaaliset maanpintamittausmenetelmät

Kallion vedenvirtaussysteemin selvittämiseksi tarvitaan tietoja kallion rakenteesta ja rakoilusta alueella. Geofysikaalisten luotausten tuloksista voidaan arvioida maakerrosten paksuutta, pohjavedenpinnan syvyyttä, kallionpinnan topografiaa ja kallion rikkonaisuutta maan peittämällä alueilla. Tuloksista voidaan arvioida myös maakerrosten jatkuvuutta, ja valita maanäytteiden ottopaikat ja tarkistuskairauspisteet.

Geofysikaalisista tutkimuksista lienee tarkoituksenmukaisin menetelmä maatutkaluotaus, jolla tutkimus aloitetaan. Tutkaluotausta voidaan täydentää seismisillä ja/tai sähköisillä luotauksilla, joilla tarkistetaan mahdollisesti tutkaluotauksissa epämääräisinä ilmenevien savi- ym. notkelmien maakerrospaksuuksia ja maan laatua. Luotaustutkimusta täydennetään maanäytteenotolla ja kairauksilla maakerrosten paksuuden ja laadun tarkemmaksi arvioimiseksi.

Petteisillä alueilla kallion vesipitoisuutta tai rikkonaisuutta voidaan arvioida joko seismisessä taittumislouotauksessa todetun alhaisen seismisen nopeuden, sähköisessä maavastusmittauksessa havaitun sähköjohtavuuden tai maavastusluotauksessa rekisteröidyn, kallioista tulevan heijastuksen perusteella. Selkeimmin voidaan erottaa kallion pystyasentoinen rikkonaisuus.

Kallion pinnan vaakarakoailua voidaan arvioida maatutkaluotauksella, jos kallion päällä ei ole tutka-aallon läpäisyä heikentäviä sähköä johtavia maakerroksia, kuten savea tai pohja-

vettä. Ulkomailla on käytetty kallion rikkonaisuuden määrittämisessä myös kokoaaltomuodon tulkintaan perustuvia seismisiä mittauksia kallion pinnalta. Mittaustuloksista on tulkittu tällöin seismisen puristusaallon (P-aallon) ja värinäaallon (R-aallon) vaimenemista.

Avokallion alueella tehdään mahdollisesti topografikartta- ja ilmakuvatulkintaan tukeutuen kallion rakenteen kartoitus, jossa määritetään kallion rikkonaisuusvyöhykkeet, avoraot ja halkeamat, niiden suunta ja kaltevuus.

3.8.4. Geofysiikkaaliset reikämittausmenetelmät

Geofysikaalisten reikämittaustulosten avulla pyritään vesipitoisten rakojen ja rakovyöhykkeiden paikantamiseen ja näin löytämään rakohavaintojen joukosta ne kallio-osuudet, joissa pohjaveden virtaus on mahdollista /22/. Geofysikaalisten reikämittausten tulkinassa analysoidaan kivilajivaihtelua, kallion rakoilun ja rakovyöhykkeiden luonnetta sekä kalliopohjaveden virtauksia. Samalla selvitetään, miten paljon kallioperässä on pohjavettä, miten se liikkuu ja millainen on veden laatu.

Geofysikaaliset yksireikäluotaukset on jaoteltu kolmeen ryhmään tärkeimmän käyttösovelluksen mukaan: kivilajivaihtelua, vesipitoista rakoilua ja rikkonaisuusvyöhykkeitä sekä pohjaveden virtausta kuvaavat luotaukset. Yleisimmät poranreikämenetelmät mittaavat reikää ympäröivää kalliota korkeintaan n. 20 cm:n etäisyydeltä. Mittauspisteiden välimatkan ollessa 10 cm tuloksena saadaan jatkuva kallion ominaisuuksia kuvaava profiili reikien välittömässä läheisyydessä.

Kivilajivaihtelua kuvaavat luotaukset

Petrofysikaalisien ominaisuuksien reikämittauksia on käytetty kivilajien tunnistamiseen ja luonnehdintaan syvyysuunnassa. Kiteisen kallion tutkimisessa tavallisimmin käytetyt menetelmät ovat olleet magneettinen susceptibiliteetti, radiometrinen tiheys, luonnon -säteily ja neutronisäteilyn takaisinsironnan mittausta, joilla saatavat tulokset luonnehtivat erilaisia kivilajijaksoja hyvin.

Susceptibiliteetti kuvastaa kiven kehityshistoriaa, kiteytymisolosuhteita ja mineraalikoostumusta, sillä ferrimagneettisissa kivissä susceptibiliteettiin vaikuttaa pääasiassa kiven magnetiittimäärä ja paramagneettisissa kivissä rautapitoisuus. Kivilajien kontaktit määritetään yksittäisissä geofysikaalisissa reikäprofiileissa todettujen tasonmuutosten ja kairasydännäytteiden tarkastelun avulla. Reikämittausaineistosta lasketaan rei'ittäin susceptibiliteetin, -säteilyn ja -tiheyden tilastolliset tunnusluvut kullekin todetulle kivilajijaksolle.

Vesipitoista rakoilua ja rikkonaisuusvyöhykkeitä kuvaavat luotaukset

Kairausreikien lähiympäristöä koskevassa kallioperän rakenteen tutkimisessa käytetyt reikägeofysikaaliset menetelmät ovat sähköisen maadotusvastuksen mittausta sekä kallioperän ominaisvastuksen mittausta. Reiän halkaisijan mittausta lukuun ottamatta kaikkiin mitattaviin suureisiin vaikuttavat paitsi kallioperän rakenteelliset tekijät myös kivilaji-vaihtelu. Käytetyt menetelmät ovat rakoiluun nähden välillisiä ja niiden luotettavuuteen vaikuttavat sekä rakoilun luonne että mittaustavat.

Rikkonaisten reikäosuuksien havaitsemiseksi ja niiden fysikaalisten ominaisuuksien määrittämiseksi käytetään reikä tutkimusten yhteistulkintaa. Yhteistulkinnalla pystytään melko luotettavasti rajaamaan vesipitoisen rakoilun esiintyminen. Savitäytteistä rakoilua ei yhteistulkinnallakaan pystytä erottamaan puhtaasti vesipitoisesta rakoilusta. Vertailemalla eri tutkimussäteen omaavilla mittausten menetelmillä saatuja tuloksia keskenään pyritään arvioimaan rikkonaisen rakenteen paksuudesta, ulottuvuudesta reiän ympäristöön, reiän seinämien eheydestä sekä vyöhykkeen sisäisestä rakenteesta.

Pohjaveden virtausta kuvaavat luotaukset

Pohjaveden virtauspaikkojen ja -suuntien selvittämiseksi on käytetty vesiluotausta ja omapotentiaalimittausta. Vesiluotausta varten reikään vaihdetaan resistiivinen tislattu vesi. Tämän jälkeen mitataan noin kahden vuorokauden aikana viisi kertaa reiässä esiintyvän veden ominaisvastus ja lämpötila. Vertailemalla näistä lasketutuja TDS-profiileja (total dissolved solids) voidaan paikallistaa reikäsyvyydet, joissa suolaista kalliopohjavettä virtaa reikään.

Omapotentiaalimenetelmässä mitataan potentiaaliero reiässä olevan anturin ja maanpinnalle sijoitetun vertailuelektrodin välillä. Mittauksille on tyypillistä, että mitattava fysikaalinen ominaisuus voi liittyä useampaan geologiseen tai hydrologiseen ominaisuuteen. Tämän vuoksi tulkinta on hyvin paikkakohtaista.

3.8.5. Kallion rakenteen tutkiminen

Kallion rakenteen selvittämiseksi tehdään kallioporauksia esimerkiksi 20 metrin verkossa. Porausten yhteydessä on mahdollista mitata poran tunkeutumisnopeutta mahdollisten heikkousvyöhykkeiden toteamiseksi. Poraukset ulotetaan vähintään 5 metriä tulevan kaivannon pohjan alapuolelle.

Porausrei'issä on mahdollista tehdä reikävideointi. Videokuvista tulkitaan kallion laatua ja rikkonaisuutta, joka voidaan esittää porausraportissa poikkileikkauksittain. Näitä tietoja käyttäen voidaan arvioida kalliomassivien rikkonaisuutta ja suunnitella edelleen läpäisevyystutkimuksia varten mm. mansettien sijaintia sekä tulkita läpäisevyyskokeiden tuloksia. Poranrei'issä voidaan tehdä myös geofysikaalisia mittauksia, joilla voidaan tunnistaa ja yksilöidä vettä johtavat raot. Ominaisvastusmittauksilla voidaan tunnistaa vesipitoiset raot,

mutta digitaalisella akustisella luotauksella voidaan arvioida myös rakojen vedenjohtavuutta. Yhdistämällä mittaus vesimenekikokeiden suoritukseen voidaan vedenjohtavuusjakaumaa reiän ympäristössä myös laskennallisesti arvioida.

Ns. tomografiatutkimuksessa mittaus tehdään kahden reiän välissä niin, että tutka-aaltoja tai seismisiä impulsseja lähetetään reiästä toiseen, ja numeerisesti mallintaen tulkitaan reikien välisen kallion läpäisevyyttä. Seismisissä mittauksissa käytetty anturikoko edellyttää vähintään 50 mm:n reikähalkaisijaa. Reikäututauksessa tarvitaan kuitenkin suurta reikäkokoa.

Kallion rakenteen tulkinnassa voidaan käyttää myös sydännäytekairausten tuloksia, jos tällaisia on tehty. Rakennetulkinnan tavoitteena on määrittää kallion rikkonaisuusvyöhykkeet ja rakoilu kallionpinnan alapuolella.

3.9. Kalliokaatopaikan hydrogeologian soveltaminen

3.9.1. Periaate

Kaatopaikan hydrogeologia jaetaan kahteen, rajapinnalla toisiinsa liittyvään osaan: 1. alueellinen hydrogeologia kaatopaikan ympärillä; 2. kaatopaikan jäteaineiden kulkeutuminen kaatopaikasta alueelliseen hydrogeologiseen systeemiin. Edellinen on muuttamaton, suuruusluokaltaan mitattavissa oleva ao. kaatopaikan ympäristö. Jälkimmäinen on rajoitetusti säädeltävissä, mutta ei tarkkaan havainnoitavissa oleva järjestelmä.

Täysin jäteainetta läpäisemätöntä rajapintaa ei liene olemassa. Hydrogeologian kannalta kaatopaikassa oletetaan olevan äärettömästi jätettä, mikä tarkoittaa sitä, että kaatopaikasta vuotanut jäteaine ei vähennä kaatopaikan jäteaineen määrää, eikä kaatopaikalle edelleen lisää tuotava jäteaine lisää sitä, vaan kaatopaikka pysyy vakiona hydrogeologisena riskinä ajan suhteen. Jäteaineen kulkeutumisen määrä kaatopaikasta rajapinnan läpi ympäristön pohjavesiin riippuu seuraavista osittain erillisistä tekijöistä:

1. Rajapinnan tiiviys.
2. Hydraulinen gradientti rajapinnan yli.
3. Kaatopaikan luovutuskyky.
4. Alueellisen systeemin vastaanottokyky.
5. Sadanta.
6. Kaatopaikan muotoilu

Rajapinta ei voi olla täysin tiivis. Sen vuotaminen on kuvattavissa läpäisevyyden tapaisella suureella. Vuotamisen suunta taas riippuu gradientin suunnasta. Rajapinnan yli tapahtuu monenlaista liikettä, joista huomattavin on veden virtaus. Jos paikalla on muita, veteen liukenemattomia aineita, ne kulkevat oman gradienttinsa mukaan, joka voi olla toisen suuntainen kuin pohjavedelle. Vettä raskaammat, veteen huonosti liukenevat nesteenä kuten PCB:t (DNAPL) tai vedessä olevat vettä raskaammat kiinteät partikkelit

laskeutuvat ylöspäin suuntautuvaa virtausta vastaan, ellei virtaus ole huomattavan suuri (vrt. juoksuhiikka, joka kelluu pystyvirtauksessa).

Kaatopaikan luovutuskyky riippuu siitä, onko siinä sellaisia juoksevia nesteitä, jotka sekoittuvat pohjaveteen. Pohjaveden vastaanottokyky käsittää sen liikkumisen määrän: Nopeasti tai suurella volyymilla liikkuva pohjavesi toisaalta kuljettaa myös jätettä tehokkaammin kuin heikompi virtaus, toisaalta se myös laimentaa jätettä tehokkaammin.

3.9.2. Alueellinen hydrogeologia

Päästöjen kulkeutumisen kannalta olennaisia hydrogeologisia suureita ovat virtaustiheys ja virtausnopeus. Virtaustiheys (eli virtausmäärä, q , m/s), määrää kaatopaikkaa sivuavien pohjavesivirtausten volyymin. Mitä suurempi volyymi, sitä suurempi on lika-ainekuorituksen laimeneminen. Mitä suurempi volyymi, sitä enemmän jäteaineita pohjaveteen mahtuu. Virtausnopeus puolestaan määrää, kuinka nopeasti pohjaveden mukana kulkeutuva suodos kulkeutuu pois kaatopaikka-alueelta. Virtausnopeus on relevantti lähinnä uusissa päästöissä.

Pohjavesivirtaus on aina heterogeenista. Se lähenee homogeenista virtausta paksuissa hiekkakerrostumissa. Savessa ja kallioperässä pohjavesivirtaus on voimakkaasti kanavoitunutta. Jos pohjavesivirtausta tapahtuu humus- tai moreenimaassa, voidaan savessa ja kalliassa tapahtuva pohjavesivirtaus usein jättää huomiotta. Jos pohjavesivirtausta tapahtuu myös hiekka- tai sorakerrostumassa, voidaan taas kaikki muut maalajikerrostumat usein jättää huomiotta. Huomiotta jättäminen ei tarkoita, etteikö tässä tapahtuisi pohjavesivirtausta yhtä lailla, vaan että volyymi on muualla niin suuri, että toisen osuus on merkityksetön.

Alueellisen pohjavesivirtauksen volyymin selvittämiseksi tehdään pohjatutkimuksia ja maaperäselvityksiä vedenjohtavuuden määrittämistä varten sekä pohjavedenpinnan tarkkailua havaintoputkistolla. Tarkkailun tulisi olla ympärivuotista, toivottavasti useampi-vuotisesti, jotta saadaan riittävä käsitys vedenpinnan korkeuden vaihtelusta.

Tarvittavat tekniikat kokeiden tekemiseen ovat olemassa. Tietoa ja käytännön kokemusta kokeiden suorittamisesta tarvittaisiin kuitenkin lisää, jotta yleisohjeita voitaisiin antaa. Ei ole myöskään varmuutta siitä, millä tasolla ohjeiden tulisi olla ollakseen yleisiä. Tässä kohdassa viitataan maan laadun ja rakenteen vaihteluun ja sijaintipaikkojen yksilöllisyyteen.

3.9.3. Kaatopaikan päästöjen rajoittaminen

Koska kyseessä on rajoitettu alue, on tarkastelu suoritettava kaatopaikan yksilöllisyyden ja kallioperän heterogeenisuuden pohjalta. Yleistä, kaikkia kaatopaikkoja koskevaa toimintaohjetta ei voi antaa muuta kuin periaatteellisella tasolla.

Kallio on pääsääntöisesti tiivistä. Rakoilu merkitsee ensimmäisen asteen poikkeamaa tiiviydessä. Rakoja on kaikkialla kalliossa. Rakoilleen kallioperän tiiviys riippuu rakojen avaumasta. Erityisesti kallion pinnassa raot ovat avoimempia kuin syvemmällä. Se johtuu pinnassa vaikuttavasta ilmakehän (sade, tuuli, aurinko, jäätyminen ja lämpötilamuutokset) rapauttavasta vaikutuksesta ja syvällä vaikuttavasta, rakoja sulkevasta kallion litostaattisesta painosta. Räjäytykset aiheuttavat myös kallion tiiviyden pienenemistä.

Rakoillut kallio voi olla jossakin määrin homogeenisesti rakoillutta, jolloin sen vedenjohtavuutta voi kuvata ehkä yhdellä ainoalla tunnusluvulla. Vedenjohtavuus on tällöin määritettävissä edustavilla pumppauskokeilla. Pumppauskokeessa mitataan esimerkiksi vedenpaineen kehittymistä pumpatun vesimäärän ja/tai ajan funktiona (transientti- tai stationäärikoe). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää muutamaa erillistä vedenjohtavuuden arvoa eri lohkoille, jos ne ovat riittävän homogeenisia.

Kaatopaikkaa mahdollisesti sivuava rikkonaisuusvyöhyke -ruhje- muodostaa toisen asteen poikkeaman tiiviyteen. Ruhjeen vedensiirtokyvyn odotetaan olevan kvalitatiivisesti kertaluokkaa suurempi kuin tavanomaiseen kalliorakoiluun liittyvä vedensiirtokyky. Koska ruhje on usein leveydeltään rajoitettu, eivät sitä kautta kulkevat pohjavesimäärät ole kuitenkaan välttämättä merkittäviä koko kaatopaikan vuotovesissä, ainakaan suurilla kaatopaikoilla. Rajoittuneisuuden takia ruhje on myös helpommin eristettävissä. Ruhje on kuitenkin omiaan levittämään jäteainetta tehokkaammin. Tavallinen kalliorakoilu johtaa jäteaineet kalliossa lähietäisyydelle, kun taas ruhje saattaa syöttää jäteaineen syvälle tai etäälle kaatopaikasta, jolloin jäteaineet leviävät laajemmalle.

Ruhjeen vedensiirtokykyä voidaan testata vuorovaikutuskokeella, joka on kuitenkin työläs ja kallis, eikä välttämättä tuota haluttua tietoa. Vuorovaikutuskoe edellyttää onnistuakseen seikkaperäisiä geologisia ja geofysikaalisia tutkimuksia, joilla paikannetaan ruhjeen sijainti sekä mahdolliset muut ruhjeet, jotka siihen liittyvät lähialueella. Ruhjeiden testaaminen tyhjentävästi ei ole toistaiseksi mahdollista.

3.9.4. Luonnollinen vuotovesitarkastelu

Tässä kohdassa tarkastellaan kalliosta kaivantoon suuntautuvaa pohjavesivirtausta. Jos kaivannon hydraulinen korkeustaso jää ympäristön pohjavedenpinnan alapuolelle, suuntautuu ympäristöstä kalliokaivantoon pohjavesivirtaus. Jos ympäristön läpäisevyys olisi homogeeninen, kattaisi ko. virtaus koko kaivannon ympäristön mukaanlukien kaivannon alapuoliset kalliotilat. Kuitenkin, mitä kauempana kaivannosta ollaan, sitä vähäisempää virtaus on. Valtaosa virtauksesta tapahtuukin aivan kaivannon reunan tuntumassa, tyypillisesti siten, että kallion pinnassa aivan kaivannon reunalla veden imeytyminen kallioon on suurinta, ja taas aivan kaivannon seinämän juuressa vuotaminen kaivantoon on suurinta, kuva 3.4a. Valtaosa vuotovirtauksesta tapahtuu kumminkin puolin jalkalistaa, aivan seinämän alaosassa ja pohjassa lähellä seinämää. Koska valtaosa virtauksesta tapahtuu näin seinämän lähetyvillä, ei toisaalta kaivannon leveydellä eikä toisaalta myöskään

kaivantoa ympäröivän maaston mittasuhteilla ole sanottavaa merkitystä vuotovesimäärään. Tarkastelu voidaan tehdä kaiken kokoisille ja muotoisille kaivannoille yhtä aikaa.

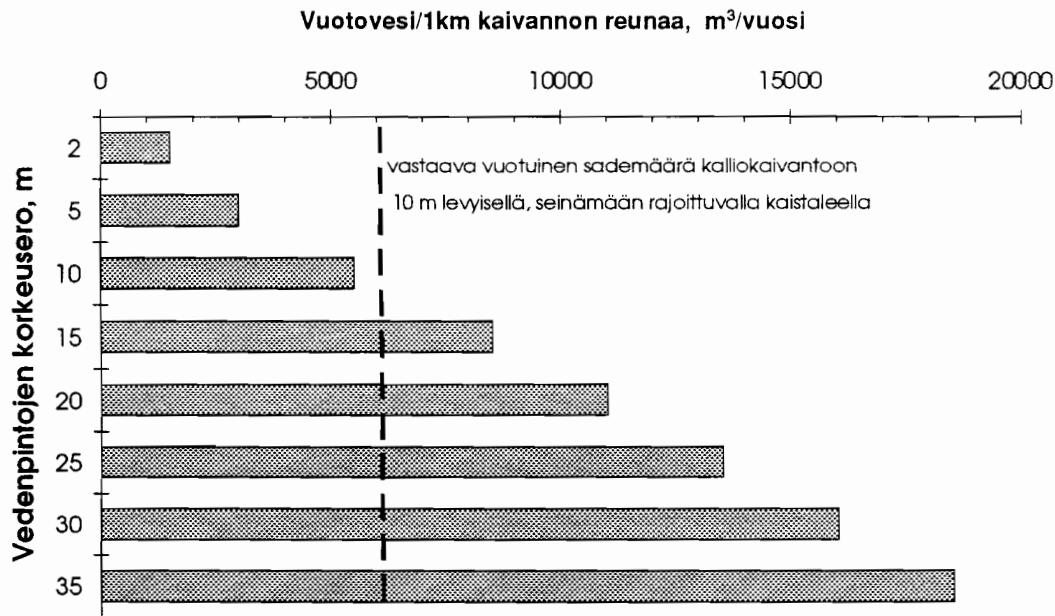
Vuotovesimäärään vaikuttaa kaivannon syvyys ja kallion läpäisevyys. Kallion läpäisevyyden vaikutus on lineaarinen, jos kallio oletetaan homogeeniseksi. Epähomogeenisen kallion läpäisevyyden vaikutus ei ole lineaarinen, mutta mitä se on, riippuu tapauksesta. Sitä voidaan arvioida lineaarisella käyttäytymisellä, mutta arvion tarkkuus riippuu tapauksesta.

Kaivannon syvyyden vaikutus vuotovesimäärään laskettiin FEM-pohjaisella menetelmällä, jonka oletuksena on homogeeninen virtausväliaine. Kuvassa 3.3 on esitetty vuotuinen vuotovesimäärä suoran seinämän yhtä kilometriä kohti. Seinämän pituuden vaikutus on lineaarinen, eikä seinämän muodolla tai kaarevuudella ole sanottavaa merkitystä vuotovesimäärään niin kauan kuin seinämä on likimain suora. Vuotoa on tarkasteltu erityyppisille kaivannoille siten, että reuna pidetään koko ajan saturoituneessa tilassa eikä kallio kuivu. Toisaalta kaivanto pidetään koko ajan tyhjänä. Tarkastelu pätee samoin ehdoin myös täytetylle kaivannolle, edellyttäen, että asiaa tarkastellaan tosiasiallisen vedenpintojen korkeuseron puitteissa, joka täytetyssä kaivannossa voi olla muutakin kuin seinämän korkeus.

Kaivannon reunan pitäminen saturoituneena edellyttää mainitun vesimäärän siirtämistä kaivannon reunalle niin, että kallion reuna ei kuivu. Kallion vedenjohtavuuden arvolla, $K=10^{-8}$ m/s, vesimäärä vastaa suuruusluokaltaan sadetta silloin, kun koko vuoden sademäärä (noin 60 cm) tasattaisiin yhtäjaksoiseksi, jatkuvaksi stationääriseksi, läpi vuoden kestäväksi tihkusateeksi. Se on 0,07 mm tunnissa. Lisäksi edellytetään, että koko sademäärä imeytyy kallioon. Koska sade on kuitenkin ajoittaista ja kasautunutta, ei sitä voi hyödyntää tämän tarkastelun puitteissa, vaan sateen pääosa, sade lähes kokonaan, ohittaa tapahtumahetkellä tarkasteltavan kallion kaivannon reunassa. Koska kallioon pystyy imeytymään vain 0,07 mm/h vettä, pääosalle sadevedestä vain ohitus on mahdollista. Vielä arvoilla $K=10^{-9}$ m/s ja allekaan, imeytyvän veden osuus ei riitä jatkuvaan läpivirtaukseen. Voidaankin todeta, että sateella ei ole merkitystä tarkasteltaessa kaivannon reunan vuotovesiä. Sateen osuus seinämään rajoittuvan 10 m leveän kaistaleen alueelle on merkitty kuvaan katkoviiivalla. Vastaavasti 20 m leveälle kaistaleelle sataa kaksinkertainen määrä, jne.

Kaivannon reuna tulee pidetyksi saturoituneena sellaisessa tapauksessa, kun kallion päällä on hyvin vettäjohtava kerros (esim. turvekerros), jolla on yhteys ehtymättömään lähteeseen, kuva 3.5. Tällöin kuvan 3.3 mukaiset vuotokertymät ovat odotettavia.

Vuotovesimäärät on laskettu olettamalla kallion homogeeniset läpäisevyysominaisuudet. Kallion todelliset läpäisevyysominaisuudet merkitsevät vuotomääriin mahdollisesti useammankin kertaluokan poikkeamia, suuntaan tai toiseen. Toisaalta vuotomäärät voivat olla kohtalaisen oikeinkin, tapauksesta riippuen.

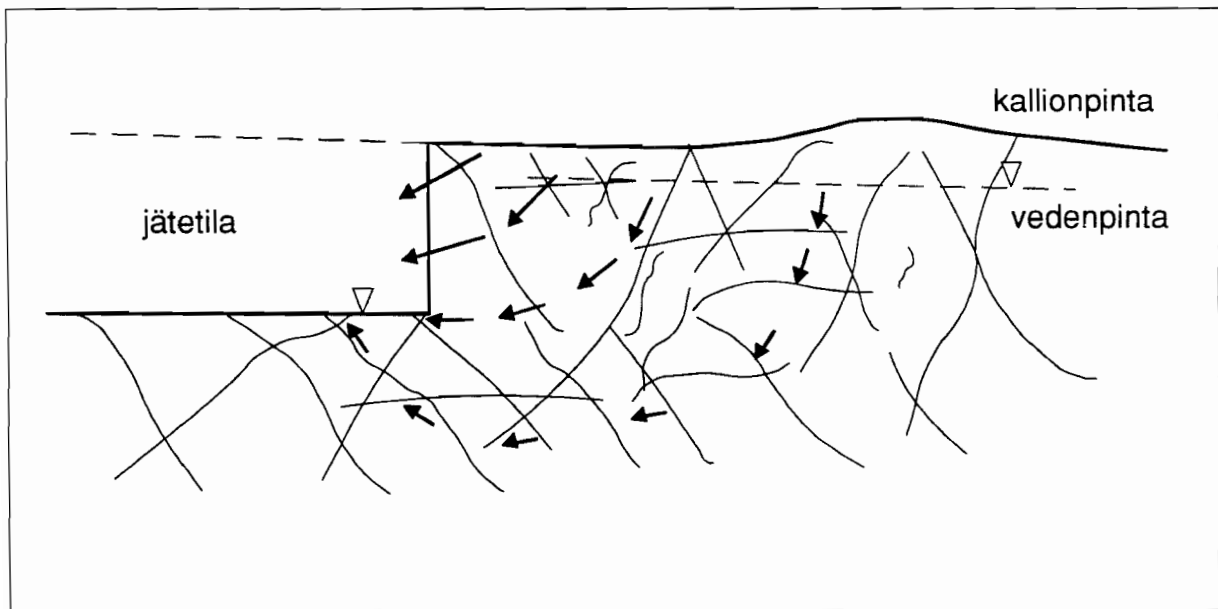


Kuva 3.3. Laajan homogeenisen kaivannon reunan vuotovesimäärä yhtä kilometriä kohti erilaisilla vedenpinnan korkeuseroilla (tai kaivannon syvyyksillä), kun ympäröivän kallion vedenjohtavuus on, $K=10^{-8}$ m/s.

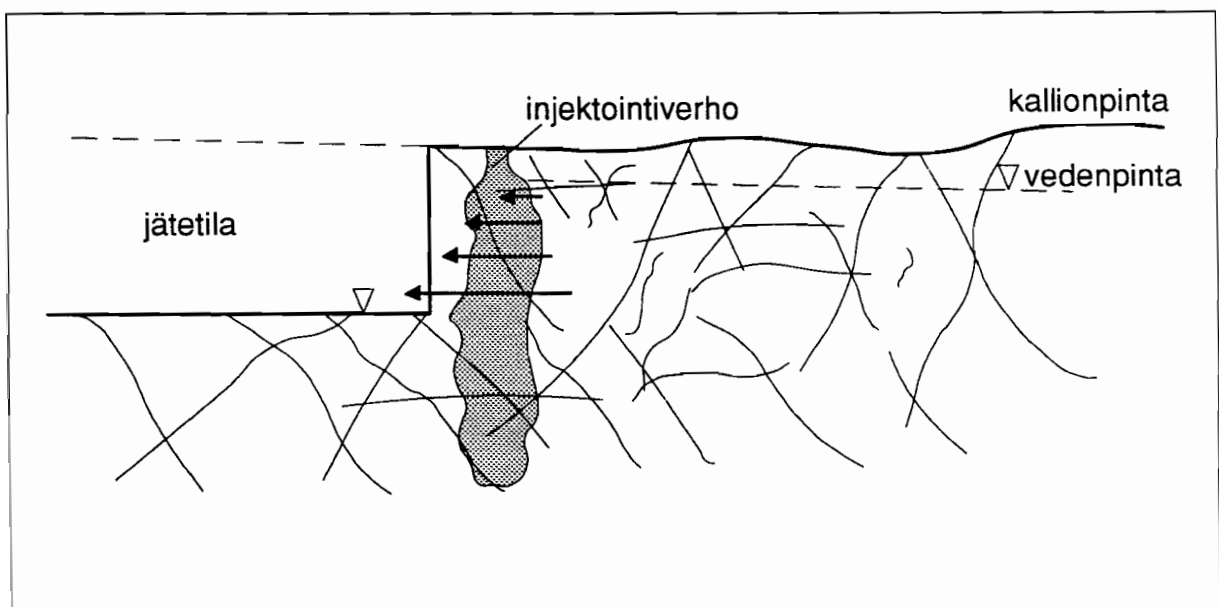
Jos kaivannon reuna ei ole em. vastaavassa kuljettuvassa yhteydessä vakiovesivarastoon, kallioreuna kuivuu, ja myöhemmät vuotovedet ovat minimaalisia. Kokonaisvuotovesimäärä on silloin lähellä kallion reunan sisältämää vesimäärää. Jos kallion tehokas huokoisuus on 0,001 (sitä suurempi se ei juuri voi olla), on maksimivuotovesimäärä luokkaa z^2 m³/1km, missä z on kaivannon reunan korkeus (m). Tällaisen vuotoveden määrä tulee samaan suuruusluokkaan ym. stationäärisen vuotovirtauksen kanssa silloin, kun kallioreunan tyhjentyminen tapahtuu vuoden jokaisena päivänä.

Kalliokaivantoon pyrkivän vuotoveden määrä on merkityksellistä vain kaivannon ollessa notkelmassa vakiovesivaraston alapuolella. Siinä tapauksessa kuvan 3.3 tulokset ovat suuntaa antavia, jos kallion vedenjohtavuus on luokkaa, $K=10^{-8}$ m/s. Jos vedenjohtavuus pienenee kymmenenteen osaan, myös vuotovesimäärä pienenee kymmenenteen osaan, jne. Kaivantoon pääsee vettä mahdollisesti myös pintavaluntana, jolloin kuvan 3.3 tiedot käsittävät vain kallion läpi virranneen veden.

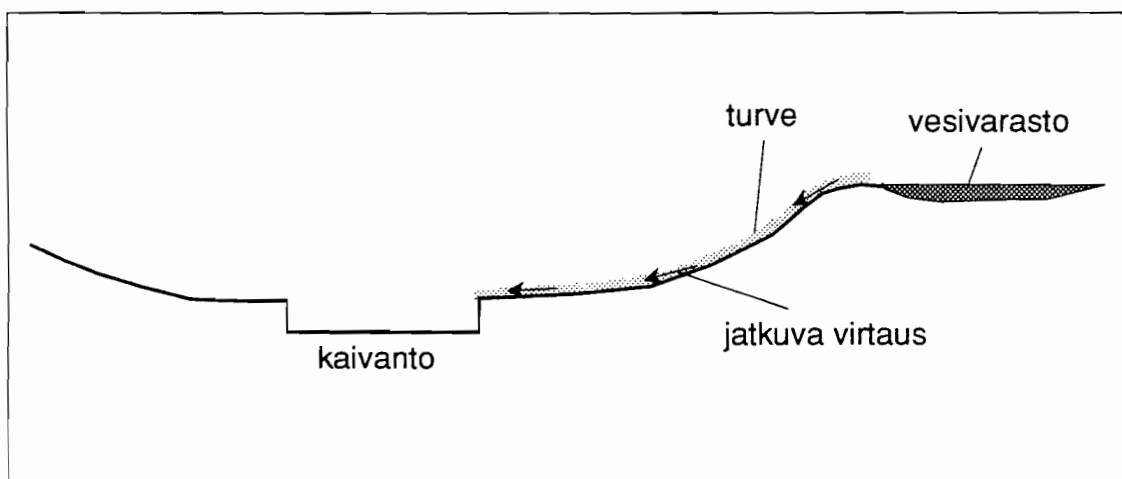
Koska kuvan 3.3 vuotovesimäärän toteutuminen edellyttää jatkuvaa yläpuolisen kallio-pinnan imeyttämistä, todelliset vuotovesimäärät riippuvat mahdollisesti useimmissa tapauksissa enemmänkin käytettävissä olevan veden määrästä. Kuvan 3.3 termein, ko. vuotoa ei voida ylläpitää stationäärisenä veden loppumisen takia, vaan kallio alkaa kuivua.



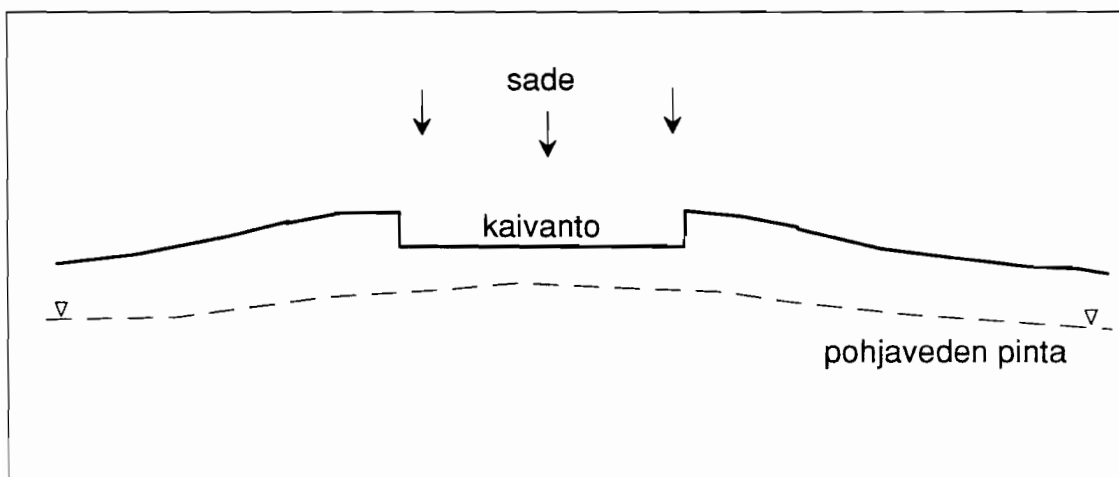
Kuva 3.4a. Eristämättömän kaivannon reunan vuotovesivirtaus



Kuva 3.4b. Eristetyn kaivannon reunan vuotovesivirtaus



Kuva 3.5a. Ehtymättömään lähteeseen yhteydessä oleva kaivantoreuna.



Kuva 3.5b. Kuivuva kalliokaivanto.

3.9.5. Vuotoesteen virtaamatarkastelu

Seuraava vuotoesteen virtaamatarkastelu käsittää erilaisissa oloissa mahdollista pohjaveden virtauskäyttäytymistä. Tarkastelu on esimerkinomaista, jota ei voi pitää todellisena ilman sen tueksi tehtäviä hydraulisen potentiaalin mittauksia. Sellaiset mittaukset merkitsevät useamman vuoden kestävästä seuranta. Esimerkit ovat kuitenkin realistisia, joskus ne sisältävät jopa todennäköisiä virtaamia. Tarkastelun tarkoituksena on luoda yleiskuvaa virtaamaesteen toiminnasta ja mahdollisista vuotovesimääristä.

Pystysuorasta kallioseinästä virtausesteen läpi virtaa ulos vuotovesi, kuva 3.4b. Vedenjohtavuus esteen takana olevassa kalliossa oletetaan seuraavassa paljon suuremmaksi kuin esteen vedenjohtavuus. Veden paine esteen eri puolilla on vakio, ja virtausgradientti muodostuu esteen yli vallitsevasta paine-erosta. Vuotovesi lasketaan silloin kaavasta:

$$\bar{Q} = \int_0^L \left\{ \int_{z_0(x)}^0 K(x,z) \bar{i}(x,z) dz \right\} dx$$

jossa Q on virtaama, x on paalulukemakoordinaatti (0..L), z on kallion pinnasta mitattu syvyyskoordinaatti (0.. z_0), z_0 on tilan pohjan syvyys kallion pinnasta (muuttuja), i on gradientti ja K on vedenjohtavuus. Kun kallio on kokonaan vettynyt, gradientti i lasketaan kaavasta

$$i(x,z) = \frac{z}{\Theta(x,z)}$$

jossa Θ on virtaamaesteen paksuus. Jos K ja Θ oletetaan vakioiksi, virtaama saadaan kaavasta

$$Q = \frac{K}{2\Theta} \int_0^L (z_0(x))^2 dx$$

Jos virtaamaa halutaan arvioida n kpl paloittain vakiosyvässä kallioseinässä, z_i , $i=1..n$, jonka osuus koko juoksupituudesta on L_i , kaava tulee muotoon

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{K_i z_i^2 L_i}{2\Theta_i}$$

Tällöin K_i ja Θ_i tulee olla vakiot ko. seinämäosassa i . Virtausesteen läpi virtaavan pohjaveden määrä riippuu suoraviivaisesti vedenpintojen korkeuserosta esteen molemmiin puolin ja esteen läpäisevyydestä. Kääntäen se riippuu esteen paksuudesta: mitä paksumpi este, sitä pienempi vuotovesimäärä.

4. Kallion tiivistäminen

4.1. Yleistä

Kalliota louhittaessa räjäytyskaasujen painevaikutus voi tehdä uusia rakoja ja avata vanhoja rakoja. Samalla voi avautua uusia kulkeutumisreittejä louhinta-alueen viereisiin tai alaisiin rakoihin ja vettäjohtaviin vyöhykkeisiin. Tämän vuoksi olisi tarpeen tarkistaa mittauksin ainakin ne reiät, joissa on ennen louhintaa todettu olevan vettäjohtavaa rakoilua.

Louhinnan ja tiivistämisen vaikutusten arvioimiseksi voidaan tehdä vertailututkimuksia ennen ja jälkeen. Läpäisevyystudkimusten ohella voidaan tehdä geofysikaalisia mittauksia käyttäen samaa tutkimusmenetelmää. Injektointiaineen kulkeutumista on mahdollista monitoroida mittaamalla injektointilietteeseen sekoitetun merkkiaineen kulkeutumista esimerkiksi kallion pinnalta tehdyllä sähköisellä luotauksella.

4.2. Louhinnan vaikutus vedenläpäisevyyteen

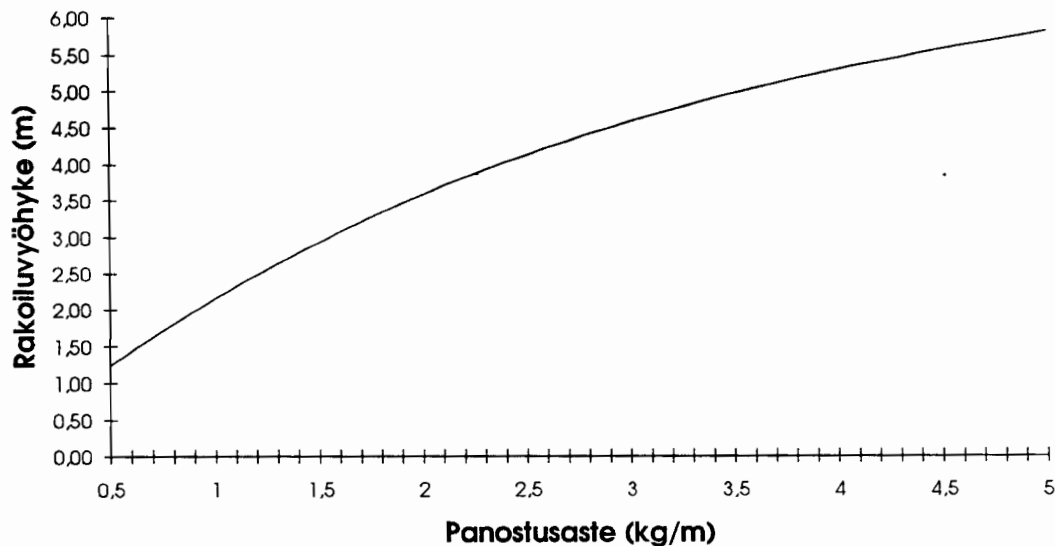
Räjähdyksineen räjähtäessä porausreiässä kehittyy ensimmäiseksi suuri paine, joka yhdessä korkean lämpötilan kanssa murtaa reiän seinämät 1 -5 kertaa reiän säteen suuruiselta alueelta /17/. Samalla reiän ympärille muodostuu vetojännityksestä johtuvaa säteettäistä halkeilua. Räjähdyksessä syntynyt paineaalto etenee kalliossa puristusaaltona. Jos se kohtaa ennen vaimenemistaan vapaan pinnan, niin puristusaalto heijastuu siitä ja muuttuu vetoaalloksi. Syntyneet vetojännitykset aiheuttavat kallioon lisää uutta rakoilua. Lopullinen rikkoutuminen johtuu kuitenkin siitä, että räjähdyskaasut tunkeutuvat kalliossa jo olleisiin tai vetojännityksistä syntyneisiin rakoihin laajentaen ja kasvattaen niitä. Mikäli räjäytyskohdan ja vapaan pinnan välinen etäisyys ei ole liian suuri, rakoilu etenee vapaaseen pintaan asti ja kallio rikkoutuu. Normaalisissa louhinnassa vapaan pinnan ja räjäytysreiän väli, etu, on sellainen, että kallio rikkoutuu vapaaseen pintaan päin, koska suurin osa energiasta pääsee kulumaan jo olleisiin tai vetojännitysten synnyttämien rakojen laajentamiseen ja kasvattamiseen. Reiän takana, louhitussa seinämässä, uutta rakoilua syntyy vain rajoitetussa määrin pääosin alkuvaiheessa syntyvän suuren paineen vuoksi. Räjähdykskaasujen avamaa rakoilua esiintyy pääosin seinämän yläosassa, koska kallion yläpinta on myös vapaa pinta. Vaikutus esiintyy pääasiassa vaakaraoissa, mutta jossain määrin myös pystyraoissa.

Louhinnan vaikutus kallion vedenläpäisevyyden kasvamiseen perustuu pääasiassa kahteen seikkaan:

- alkuvaiheen suuresta paineesta syntyvään rakoiluvyöhykkeeseen, joka voi ulottua muutamasta kymmenestä senttimetristä useiden metrien päähän riippuen käytetystä panostusasteesta (räjähdysaine-kg/m),
- kallion pintaan ulottuvien rakojen avautumisesta räjähdyskaasujen vaikutuksesta.

Jäljelle jäävän kallion eheyteen voidaan vaikuttaa pitämällä panostusaste niin pienenä, että rakoiluvyöhyke pysyy kapeana. Tämä edellyttää, että panostusta on kevennettävä lopullista seinämää lähestyttäessä. Keventäminen on aloitettava niin kaukana, että rakoiluvyöhyke ulottuu kaikissa tapauksissa korkeintaan yhtä kauas kuin reunareikien aiheuttama rakoiluvyöhyke. Kuvassa 4.1 on esitetty panostusasteen vaikutus jäljelle jäävän rakoiluvyöhykkeen syvyyteen. Rakoiluvyöhykkeen laajuudesta ja varsinkin sen vedenläpäisevyysominaisuuksista on saatavissa hyvin vähän luotettavaa tutkimustietoa.

Kevennetty panostus ja louhittavan kallion helppo purkautuminen vähentää riskiä kalliossa jo ennestään olleiden rakojen avautumisesta. Rakojen avautumisvaaraa voidaan pienentää myös tiivistämällä raot ennen louhintaa.



Kuva 4.1. Panostusasteen vaikutus rakoiluvyöhykkeen keskimääräiseen syvyyteen. Kuvaaja on laskettu lähteessä /17/ esitetyistä tiedoista. Rakoiluvyöhykkeen syvyydessä esiintyy samalla panostusasteella jonkin verran vaihtelua riippuen räjähdysaineesta.

4.3. Tiivistämistekniikat

Kallion tiivistäminen tehdään injektoimalla kallion rakoihin sementtiä tai muita aineita, jotka täyttävät raot ja muodostavat siten virtausesteen. Injektointi voidaan tehdä joko ennen tai jälkeen louhinnan. Ennen louhintaa tehtävää injektointia kutsutaan esi-injektoinniksi, louhinnan jälkeen tehtävää jälki-injektoinniksi.

Esi-injektoinnissa voidaan käyttää suuria paineita ja sillä saadaan alueellinen tiivistys. Esi-injektointi tehdään yleensä systeemi-injektointina, ts. injektointireiät porataan ensin tietyn kaavion mukaan ja kallio injektoidaan reikien kautta. Ensimmäisen injektoinnin jälkeen porataan uudet reiät edellisten väliin joko samaan tai uuteen riviin ja tehdään uusi injektointi. Näin jatketaan kunnes kallion tiivistetty haluttuun tiiviuteen.

Esi-injektoidulle alueella saattaa kuitenkin jäädä kohtia, joiden lävitse virtaa vettä. Näiden kohtien tiivistäminen tehdään jälki-injektointina, joka kohdistetaan vuotavalle alueelle. Jälki-injektoinnissa reikäväli on pieni, koska suuria paineita ei voida käyttää. Jälki-injektointi vaatii huolellista suunnittelua, sillä vuodolla on taipumus siirtyä uusiin kohtiin injektoinnin edistyessä.

Injektointiaineina käytetään erilaisia sementtejä, kemiallisia aineita tai bentoniittia. Sementeistä käytetään yleisimmin tavallista yleissementtiä tai tätä hienommaksi jauhettua rapid-sementtiä. Rapid-sementin voidaan arvioida tunkeutuvan rakoihin, joiden avaukset ovat suurempia kuin 0,2 mm, yleensä kuitenkin vähintään 0,5 - 0,6 mm. Hienoksijauhetut erikoissementit tunkeutuvat jonkin verran pienempiin rakoihin, mutta käytännön tietoa näistä ei vielä ole riittävästi käytettävissä. Bentoniitti tunkeutuu jo huomattavasti pienempiin rakoihin, rajana voidaan pitää 0,1 mm:iä. Kemiallisten aineiden tunkeutuvuus riippuu aineen viskositeetista, mutta on edellisiä huomattavasti parempi.

Koska eri materiaalit pystyvät tunkeutumaan vain tiettyä avaumaa suurempiin rakoihin, saattaa erittäin hyvään tulokseen pyrittäessä olla syytä käyttää vaihteittain erilaisia aineita. Tällöin ensin täytetään isommat raot esim. rapid-sementillä ja lopullinen, pienten rakojen tiivistäminen tehdään kemiallisilla aineilla. Injektoinnissa voidaan saavuttaa hyvä lopputulos vaikka kaikkia rakoja ei saataisikaan täytettyä, sillä virtauksen estämiseen riittää virtausreitin katkaiseminen jossakin kohdassa, jolloin esim. täyttymättömiin rakoihin ei pääse vettä.

Kemiallisilla aineilla voidaan saavuttaa hyvä tiiviys, mutta useimpien aineiden komponentit ovat jossakin määrin myrkyllisiä. Reagoanut, kovettunut geeli on yleensä haitaton, mutta mikäli reaktiot eivät ole täydellisiä, vaan rakoihin jää komponentteja vapaina, saattaa niitä vapautua jossakin määrin ympäristöön.

Erilaisia injektointitekniikoita ja -aineita sekä niiden ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin lähteessä /19/.

4.4. Tavoitetiiviys

Tavoitetiiviyttä ei voida määritellä injektointiaineiden ja -menetelmien kautta, vaan se tulee määritellä muiden seikkojen perusteella. Eri aineilla saavutettavaa tiiviyttä voidaan kuitenkin arvioida aineiden tunkeutumisominaisuuksien perusteella.

Oletetaan, että kalliossa on kaksi yhdensuuntaista, tasomaista rakosarjaa. Rakosarjan 1 rakojen avauma on 0,5 mm ja väli 1 m ja rakosarjan 2 avauma 0,1 mm ja väli 0,5 m. Rakosarjasta 1 aiheutuva kallion vedenjohtavuus on $K_{s1} = 1,01 \cdot 10^{-4}$ m/s ja rakosarjasta 2, $K_{s2} = 8,09 \cdot 10^{-6}$ m/s, jolloin kallion vedenjohtavuus on, $K = 8,10 \cdot 10^{-4}$ m/s /18/. Rakosarjan 1 raot injektoidaan sementtilaastilla, jonka vedenjohtavuus on esim. $K_g = 10^{-12}$ m/s. Koska laasti ei täytä rakoa aivan kokonaan, vaan kulmiin jää injektoitumattomia alueita, niin injektoidun raon vedenjohtavuus on suurempi injektointilaastin. Jos raon leveydestä jää 10% täyttymättä, niin injektoidun raon vedenjohtavuus $K_{1g} = 10^{-11}$ m/s.

Tämän vaikutus kallion vedenjohtavuuteen on niin pieni, että rakosarjasta 2 aiheutuva vedenjohtavuus jää määrääväksi, jolloin injektoinnin jälkeen kallion vedenjohtavuus on noin $K = 8 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Todellisuudessa raot eivät kuitenkaan ole tasomaisia ja täysin toisistaan erillisiä, vaan toisiaan leikkaavia ja vesi liikkuu myös raosta toiseen. Tällöin avaumaltaan suurien rakojen täyttyminen estää ainakin osittain vedenvirtauksen pienempiin rakoihin, jolloin kallion vedenjohtavuus pienenee edelleen.

Rakojen täyttyminen, virtausesteiden muodostuminen ja niiden vaikutus riippuu hyvin voimakkaasti rakoilun geometriasta ja ominaisuuksista. Tällöin jollakin tavanomaisella injektointiaineella saavutettavaa tiiviyttä ei voida ennustaa etukäteen, vaan injektoinnin tulosta on tarkkailtava työn aikana ja muutettava injektointikaaviota sekä -aineita tarpeen mukaan siten, että rakoja täyttyy ja virtausesteitä muodostuu riittävässä määrin.

Kalliokaatopaikan injektoinnin lopputuloksen valvonnassa käyttökelpoisimpina ovat kallion vedenläpäisevyyden tutkimiseen käytetyt menetelmät, koska niiden avulla valvonta kohdistuu juuri siihen, mihin pyritään. Näiden menetelmien tekniikkaa ja tulosten tulkintaa tulisi ilmeisesti kehittää niin, että niillä saadaan nopeasti ja edullisesti tarvittavat tiedot.

5. Suositukset jatkotutkimuksiksi

5.1. Taustaa

Kallion veden läpäisevyyteen vaikuttavia ominaisuuksia on kuvattu yllä kohdassa 3, 'Kalliokaatopaikan hydrogeologia - esitutkimukset'. Sellaisia ominaisuuksia ovat ensisijaisesti homogeenisen kallion vedenjohtavuus ja homogeenisen ruhjeen vedenjohtokyky. Molemmat ovat ideaalisia suureita, joita ei juuri tavata luonnossa puhtaina. Sekä kallion että ruhjeen ominaisuudet ovat paikasta toiseen siirryttäessä useimmin muuttuvia. Ominaisuuksien homogeenisuudesta voidaan puhua kuitenkin yleisellä tasolla, esimerkiksi keskimääräisinä arvoina silloin, kun mittauksia on tehty riittävän monessa eri paikassa. Tällöin homogeenisten parametrien avulla voidaan laskea laajan alueen kokonaisvirtaamaksi todellisuutta lähestyvä arvo.

Nyt on kuitenkin niin, että itse homogeenisten arvojen paikkansa pitävyyteen sisältyy huomattavaa epävarmuutta. Homogeeniset mallit perustuvat poikkeuksetta huokoisessa maaperässä tehtyihin empiirisiin tutkimuksiin. Esimerkiksi paljon referoitua Darcyn lakia (virtaus = vedenjohtavuus $\times$ gradientti) ei ole voitu todistaa oikeaksi teoreettisesti, mutta sen kohtuullisesta paikkansa pitävyydestä ei ole epäilystä huokoisessa, täysin saturoituneessa maaperässä tehtyjen kokeiden valossa. Kallioperässä, ja erityisesti sen pintaosissa, vastaavia kokeita ei ole tehty.

5.2. Tavoitteet

Koekaivantutkimuksen tarkoituksena on saada tuntumaa kallion pintaosissa mm. vesimenekikokeilla mitattujen vedenjohtavuuksien todellisuusvastaavuudesta. Samalla selvitetään mahdollisesti esiintyvän ruhjeen käsittelemistä vastaavalla homogeenisella mallilla, ikäänkuin upottamalla ruhje muun rakoilun sekaan, kuvitellen sitä tavanomaiseksi rakoiluksi. Näin syntyvää virhettä tarkastellaan ruhjeesta tunnettuja parametreja vastaan. Lopullisena tavoitteena on saada aikaan menetelmä, jolla yksittäisissä rei'issä tehtyjen kokeiden tuloksia voidaan käyttää vuotovesimäärien ennakoimiseksi.

5.3. Tutkimuksen menetelmät

5.3.1. Koekaivantutkimus

Tutkimuksen kohteiksi valitaan edustava määrä pinta-altaita, joissa suoritetaan imeytyskokeita. Pinta-altaat ovat lähellä syvempää kaivantoa, jolloin altaan pohjassa vaikuttava imeytysgradientti voidaan laskea. Koska myös imeytetty vesimäärä on mitattavissa,

voidaan pinta-altaan pohjan vedenjohtavuus määrittää. Saatua tulosta verrataan esimerkiksi vesimenekikokeilla saatuun vedenjohtavuuden arvoon.

Pinta-altaat voivat olla luonnon altaita tai, niiden puuttuessa, altaat on louhittava kalliioon. Altaan pinta-alan tulisi olla vähintään kymmeniä neliömetrejä, jotta paikallinen kallion rakoilu olisi tarpeeksi edustavasti kokeessa mukana. Lähelle syvempää kaivantoa tehtävän koekaivannon syvyys saa jäädä minimaaliseksi, kunhan vesi pysyy siinä. Altaan vesimäärä pyritään pitämään likimain vakiona lisäämällä vettä ajoittain. Haihduntaa ja sadantaa seurataan erillisissä mittauksissa, ellei niitä estetä kokonaan. Kokeen kesto aika tulisi olla mahdollisesti jopa viikkoja, vähintäänkin useita päiviä, jotta vakiovirtausolosuhteet saavutetaan. Useamman altaan kokeet tehdään samanaikaisesti.

Esimerkinomaisesti oletetaan kallion vedenjohtavuus, $K=10^{-7}$ m/s. Kaivannon läheisyydessä gradientti on 1, jolloin rakosysteemin ylä- ja alapäässä vallitsee sama ilmanpaine. Imeytyvä vesimäärä 10 m²:n alueella (3,1 m × 3,2 m) on silloin 1 ml/s eli 86 l/vrk. Vedenjohtavuudella, $K=10^{-8}$ m/s, imeytyvä vesimäärä olisi 8,6 l/vrk.

Tulosta voi soveltaa myös suoraan kaivannon reunalla tapahtuvaan sisään virtaamaan. Jos vedenjohtavuus oletetaan edustavaksi koko kaivannon reunalle, saadaan 10 m korkean ja 100 m pitkän reunuksen kokonaisvuotovirtaamaksi 8600 l/vrk ja 860 l/vrk edellisen esimerkin vedenjohtavuuksilla. Tällöin on oletettu reunan efektiiviseksi imualueeksi alue, jonka leveys on sama kuin kaivannon reunan korkeus. Samantien tuleekin testatuksi myös tämä toistaiseksi käytännössä tuntematon suure.

Kaivannon käyttötilannetta ajatellen viimeksi mainituilla vuotovirtaamilla ei ole merkitystä, vaikka ne tuntuvatkin suurilta. 8,6 l/m²/vrk vastaa sademäärää 8,6 mm/vrk, mikä toteutuu vain harvoin. Silloinkin, kun se toteutuu, suurin osa siitä mahdollisesti valuu pintavaluntana joko suoraan kaivantoon rakoverkoston ohi, tai johonkin muuhun suuntaan.

Viimeksi mainittu reunan vähäpätöinen imuilmiö huomioon ottaen on syytä kysyä, onko reunan vuotovesillä ylipäättään mitään merkitystä kalliokaivannon kuivatusta silmällä pitäen. Se riippuu luonnollisesti kaivannon reunan korkeudesta, sillä korkeuden lisäntyessä myös imualueen leveys kasvaa. Se riippuu myös koko kaivannon pinta-alasta sikäli, että suuressa kaivannossa alueen sademäärä suhteessa reunan sademäärään on suurempi kuin pienessä kaivannossa, koska suurella kaivannolla on pinta-alaa enemmän reuna-alaa kohti. Näin pinta-alaltaan suuressa kaivannossa suoran sateen osuus korostuu, ja reunan kautta tulevan vuotovirtaaman merkitys vähenee.

5.3.2. Tunnelitutkimus

Tunnelitutkimuksen periaate imeytyksineen on sama kuin pintatutkimuksenkin. Erona on se, että vuotovedet mitataan alhaalla, tunnelissa. Tunnelin huomattavana etuna on se, että kaikki vuotovedet saadaan talteen, koska tunneli on kauttaaltaan alemmassa potentiaalis-

sa kuin ympäröivä kallio, tunnelin pohja mukaanlukien. Silloin kaikki ympärillä kalliassa oleva vesi pyrkii tunneliin, eikä haihduntakaan muodosta ongelmaa, ellei tunnelia tuuleteta. Jos tunneli on pitkä, voidaan vuotovirtaamaa lisäksi tutkia paloittain mittapatojen avulla.

Tunnelitutkimuksen avulla saadaan tietoa erityisesti syvemmän kallioperän vuotoilmiöistä, kun pintatutkimuksen kohteena on paremminkin eroosion häiriinnyttämä kallio.

5.4. Tutkimuksen toteutus

Siinä tapauksessa, että lupa saataisiin, pintatutkimuksen kohteiksi ehdotetaan Espoon Ämmäsuon kaatopaikan eteläistä tiivistysreunaa, Vantaan Pitkäsuon tutkimusaluetta sekä Helsingin Vuosaaren tutkimusaluetta, joista on jo olemassa alustavia tutkimustuloksia. Lisäksi myös muita kohteita muualta Suomesta tulee kysymykseen mahdollisuuksien mukaan, mikäli asianosaiset kunnat ovat kiinnostuneita.

Tunnelitutkimuksen kohteeksi ehdotetaan Otaniemen ns. yhdystunnelia, joka on korkeussuunnassa monotoninen ja jonka liikenne on olematonta. Tunneli soveltuu erittäin hyvin tarkoitukseen myös, koska siitä on olemassa paljon tutkimustietoa. Ympärivuotisen tunnelitutkimuksen kokonaiskustannukset ilman mahdollisia vesimenekikokeita jäänevät alle 30000mk:n.

5.5. Injektointitutkimus

Louhinnassa syntyvän rakoiluvyöhykkeen laajuus ja varsinkin sen vedenjohtavuusominaisuudet edellyttävät lisätutkimuksia. Näitä olisi tehtävä jossakin käynnissä olevassa kaatopaikan rakennuskohteessa, esimerkiksi pumppauskokein ja geofysiikan menetelmin.

Viitteet

1. IEA Bioenergy Agreement, Task VII conversion activity, Final report from the Expert Working Group on Downstream Effects of Source Separation and Screening of MSW, 1989-1991. Lund University, Report No 3155, Lund 1992.
2. Jätehuollon tietojärjestelmätyöryhmän mietintö. Ympäristöministeriö. Ympäristönsuojeluosasto. Helsinki 1991.
3. Pääkaupunkiseudun yhdyskuntajätteen koostumus 1990. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1991:3. Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta.
4. Jätteiden käsittelyä koskevat ohjeet. Sisäasiainministeriö, ympäristönsuojeluosasto 5 B, 1982.
5. Proposal for a Council Directive on the landfill waste, Council of the European Communities, COM(91) 102 final - SYN 335, Brussels, 22 May 1991.
6. Järviö, E., Petäjä, J. Björn, E., Kaatopaikkojen pohjan ja rakenteiden tiiviys, Loppuraportti. Selvitys 76 1990, Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto. Helsinki 1991.
7. Assmuth, T., Poutanen, H., Strandberg, T., Melanen, M., Penttilä, S., Kalevi, K., Kaatopaikkojen ongelmajätteiden ympäristövaikutukset, Riskikaatopaikkatutkimuksen pääraportti. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja 67, sarja A.
8. Saarikoski, K., Salminen, A., Saarelainen, S., Katopaikkateknologian perusteita. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Tiedotteita 42/1981.
9. Kaatopaikkakaasun käyttöönottokokeilu Helsingissä Vuosaaren kaatopaikalla. Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta, Ekono Oy. SARJA D:134, Helsinki 1987.
10. Freeze, A., Cherry, J., *Groundwater*. Prentice Hall, N.J., 1979.
11. Panton, R., *Incompressible Flow*. Wiley & Sons, N.Y., 1984.
12. Mase, C., Nicholson, R. Physical Hydrogeology - Lecture Notes. University of Waterloo, Ontario, Canada, 1991.
13. Snow, D., A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 1965.
14. Iwai, K., Fundamental Studies of Fluid Flow through a Single Fracture, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 1976.
15. Ylinen, A., Väättäin, A., Interpretation of the 1989-1992 Hydraulic Interference Tests at the Five TVO Sites in Finland, Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta, Report YJT-93-10, Finland 1993.
16. In Situ Experiments Associated with the Disposal of Radioactive Waste. Proceedings of the 3rd NEA/SKB Symposium on the International Stripa Project. OECD/NEA, Paris, 1990.
17. Vuolio, R. *Räjätystyöt*. Suomen Maarakentajien Keskuliitto r.y., Forssa 1991, 318 s.
18. Hoek, E. & Bray J.W. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, Lontoo 1977, 402 s.
19. Pöllä, J. Maa- ja kallioinjektointi, esitutkimus. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, tiedotteita 1069. Espoo 1989, 67 s.

20. Ylinen, A., Ämmässuon laajennusalueen injektointireikien videokuvaus, VTT:n tutkimusraportti n:o VTT/TGL1520/92.
21. Pöllä, J., Ylinen, A., Ämmässuon kaatopaikan laajennusalueen kallioperän tiivistäminen / injektointireikien vesimenekikokeet, VTT:n tutkimus 1993, valmisteilla.
22. Okko, O., Hassinen, P. Akustinen luotaus kallion rakennetutkimuksissa. VTT julkaisu 762, 69s. 1992.
23. Dörhöfer, G., The Role of Natural Geological Barriers for the Siting of Landfills in Germany. Proceedings of the Conference 'Geoconfine 93', Vol. 1. Balkema, Rotterdam, 1993.

LIITTEET 2: KOEALUEET

LIITE 2.1

Ylinen Arto, Pöllä Jukka

**KALLION TIIVISTÄMISTUTKIMUKSET
ESPOON ÄMMÄSSUOLLA**

Tammikuu 1993



VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS
Tie-, geo-, ja liikennetekniikan laboratorio

LIITE 2.1: Kallion tiivistämistutkimukset Espoon Ämmässuolla

**Jukka Pöllä, Arto Ylinen,
Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus,
Tie- geo- ja liikennetekniikan laboratorio,
tammikuu 1993**

1. Yleistä

Kaatopaikka-alueen eteläisen tiivistysreunan, kuva 6.1, kaikkiaan 42 tutkimus- ja injektointireiän (paaluluvut 538,66 - 1349,30) poraus oli saatu lopullisesti valmiiksi 15.11.1992 mennessä. Valtaosa rei'istä videokuvattiin putkikameralla 19-20.10.1992 /1/. Reikäkuvaukseen ja siihen yhdistettyyn kairausraportin tulkintaan pohjautuen VTT/TGL suunnitteli vesimenekkikokeet. Suomen Malmi Oy toteutti kokeet suunnitelman mukaan 18.11.1992 mennessä (työraportti 25.11.1992). Kaikki vesimenekkikokeet tehtiin määräsyyvyyteen poratuissa rei'issä (tavoitetaso oli noin +45,5 m). Kun kallion pinta vaihteli tasojen +50 m ja +65 m välillä, vaihteli reikien syvyys 5..20 m. Reikä 23 oli tukkeutunut tasolla +50 m. Tässä raportissa kootaan tähän päivään mennessä saatu vedenläpäisevyyden kannalta olennainen tieto kaatopaikka-alueen tiivistysreunan kallio-perästä ja esitetään alustava tiivistämissuunnitelma. Raportissa tarkastellaan myös tiivistysreunan toimintaa erilaisissa olosuhteissa.

2. Reikien kairaus ja videokuvaus

Vesimenekkikokeiden esiselvitystä varten tehtiin reikäkuvaus VTT:n metallilaboratorion putkikameralla. Tuloksena saatiin suora näköhavainto rakoihin. Tällainen tutkimus on erittäin hyvin perusteltu injektointiurakan suunnittelun yhteydessä, koska jo suunnittelu-vaiheessa voidaan tehdä valintoja sementin suhteen. Sementin valintaan vaikuttaa esimerkiksi se, ovatko raot yksittäisiä/suuriavaumaisia vai ovatko ne joukko pieniavau-maisia rakoja, vesimenekkikokeiden antaessa silti saman tuloksen.

Videokuva on editoitu nauhalle "VTT/TGL Ämmässuon laajennus/ Kairanreikäkuvaus 19-20.10.1992" /1/. Nauhan liitteenä on luettelo rei'istä ja niiden käynnistysajoista las-kettuna nauhan alusta kellolla, hh:mm:ss.

Toinen olennainen tuntumakontakti kallioperään on porareikien kairausraportti, josta käy ilmi tunkeutumisnopeus. Heikossa kalliossa tunkeutumisnopeus kasvaa logaritmisesti kiinteään kallioon verrattuna. Heikon kallion vedenjohtavuuden odotetaan olevan 1000..1000000-kertainen kiinteään kallioon verrattuna. Kairausraportti sisältää tietoa, jota kuvaamalla ei välttämättä kykene toteamaan. Kun kuvaus kykenee välittämään tietoa vain reiän pinnasta, kairautiedot edustavat usein metrienkin säteistä laajempaa aluetta reiän ympäristössä.

Videokuvauksen ja kairaustietojen tulkinta on esitetty liitteessä graafisesti. Piirroksista käy ilmi tulkitut reikiin liittyvät kallioperän ominaisuudet. Reikien välimaaston osalta ei kallioperästä tutkimuksen perusteella voi sanoa mitään jo siitä syystä, että vierekkäiset reiät ovat kauttaaltaan erilaisia. Silloinkin, kun yhtäläisyyttä nähtäisiin, olisi mahdotonta varmuudella tietää reikien välialueen geologiasta. Reikien välimatka on 20 metriä, kun kallion pintaosien luonnepiirteet jäävät yleensä sitä lyhyemmiksi.

3. Vesimenekikokeet

Vesimenekikokeet tehtiin kaikkiaan 40 reiässä. Mitattuja reikiä olivat reiät n:o -1, 0, 1..38, kuva 1. Lisäksi oli porattu reiät n:o 39 ja 40, mutta niiden sijaintipaikassa oli poraajan mukaan niin paljon mutaa, ettei niiden tutkimisesta olisi tullut mitään. Ko. reikien suut olivat pohjavedenpinnan alapuolella, niin ettei niihin saatu näköyhteyttä. Reikien numerot viittaavat aiemmissa yhteyksissä käytettyyn numerointiin. Reikien numerojärjestys osoittaa niiden keskinäisen aseman. Peräkkäisten reikien etäisyys on pääsääntöisesti 20m.

Vesimenekikokeet suoritti Suomen Malmi Oy tilaajan toimeksiannosta VTT/TGL:n ohjeiden mukaisesti. Ohjeet perustuivat VTT:n tekemän porareikäkuvauksen tulkintaan. Ohjeet on aiemmin toimitettu tilaajalle. Vesimenekikokeet poikkesivat ohjeista seuraavissa kohdissa, suoritusjärjestyksessä:

Reiät 23-27, 29, 35:

alempi mittaus jätettiin tekemättä, koska ylemmässäkään ei ollut mitattavaa vesimenekkiä.

Reiät 16, 17, 0, -1:

Reiät oli vastaporattuja, eikä niiden rakenteesta ollut tietoa. Reiät koestettiin umpimähkäisesti koko reiän osuudelta ja alemman puolikkaan osuudelta, paitsi reiät 16 ja 17 vain koko reiän osuudelta. Reiässä 16 ei ollut vesimenekkiä, ja reikä 17 oli niin lyhyt, ettei kahdessa kokeessa ollut mieltä.

Reiät 23-25:

Koska varsinaisessa kokeessa ei saatu vesimenekkiä, vaikka reikäkuvauksen tulkinta oli vihjannut vuotavista vyöhykkeistä rei'issä, oli reiät varmuuden vuoksi koestettava suurella paineella (max 2 bar), jotta tiedettäisiin, oliko vesimenekin puuttumisen syynä todella reiän tiiviys, vai oliko siihen jokin muu syy, esimerkiksi luonnollinen, korkeuseroista johtuva vastapaine. Tulos oli, että alkuperäisen kokeen tulokset olivat oikeat.

Ohjeista poikkeaminen tapahtui yhteisymmärryksessä valvojan ja tilaajan kanssa, kun kysymys oli teknisestä yksityiskohdasta (valvoja) ja/tai kustannuksiin vaikuttavasta yksityiskohdasta (tilaaja). Kokeiden suorittaja on raportoinut kokeiden tulokset.

4. Vesimenekikokeiden tulkinta

Vesimenekikokeet on tulkittu superpositioperiaatteella niiden reikien osalta, joissa tehtiin useampia mittauksia. Menetelmällä voidaan arvioida reiän yläosaan liittyvän kallion vedenjohtavuutta, vaikka reiän yläosaa ei suoraan mitattukaan, vaan ainoastaan koko reikä ja alaosa mitattiin erikseen. Tällöin arvioidaan kahden muun kokeen perusteella, mikä määrä vettä oli mennyt reiän yläosaan liittyvään kallioon.

Vedenjohtavuudet on laskettu vesimenekikokeiden suorittajan toimesta ns. Moyen menetelmällä. Moyen menetelmän heikkous kallioperätarkasteluja ajatellen on se, että se perustuu pallosymmetriseen homogeeniseen virtausmalliin, jota kallioperässä ei ole, erityisesti ei kallion pintaosissa. Indeksimenetelmänä Moyen kaavaan perustuva menetelmä on kuitenkin käytännöllinen: se järjestää mittausaineiston, mutta absoluuttiset arvot ovat aina epätarkkoja. Jos pumppauspaine ja mittausalue olisivat identtiset kaikissa mittauksissa, voisi Moyen vedenjohtavuuden sijasta suoraan käyttää virtaamaa (l/min) järjestäjänä, ja tulos olisi sama. Moyen kaavan etu on pelkästään se, että eri pituiset ja eri paineiset mittaukset saadaan samalle viivalle, mutta rakoilleen kallioperän tapauksessa skaalaus on kohteesta riippuen enemmän tai vähemmän harhainen.

Moyen kaavan tuottaman vedenjohtavuuden virheen arvellaan usein olevan maksimisaa yhden dekadin luokkaa, mutta mikään ei estä sitä olemasta suurempikin, etenkin kallion pintaosissa.

Vedenjohtavuuden virhettä ei voi arvioida tarkemmin, tapauskohtaisesti, mutta tekemällä uusintamittauksia käyttäen eri pumppauspaineita ja pakkeriasetteluja vedenjohtavuudesta saa luotettavamman käsityksen. Tulokset on esitetty lähteessä /2/.

5. Alueen yleisvirtaama.

Kaatopaikka-alue ympäristöineen on pääpiirteissään etelän/lounaan suuntaan viettävää maastoa. Alueen pohjoisosassa on kuitenkin myös pohjoiseen viettävää maastoa. Alueen luonnontilaisesta pohjavesivirtauksesta ei voi ilman asianmukaisia mittauksia esittää arvioita. Toisaalta alueella tehtyt louhinta- ja ojitusjärjestelyt ovat mahdollisesti muuttaneet luonnontilaista virtausta. On mahdollista, että alueen pohjoisosassa pohjavedet virtaavat pohjoisen/koillisen suuntaan, mutta ne voivat myös osittain virrata kaivannon ali etelään. Osa pohjoisen puolen sadannasta virrannee suoraan kaivantoon.

Jos kaivannon alinen kallioperä on hyvin vettä johtavaa, mahdollisesti pohjoisen suunnasta tulevat pohjavedet virtaavat runsaina kallioperässä, kaivannon alla. Jos kallioperä on puolestaan huonosti vettä johtavaa, pohjavesiä tulee vain vähäisesti, enimmänsä osan vuotaessa suoraan kaivantoon. Kummassakaan tapauksessa mahdollisesti pohjoisen suunnasta tulevat pohjavedet eivät osallistu aktiivisesti reunavirtausesteen tienoilla tapahtuviin hydrogeologisiin ilmiöihin. Aktiivisella tarkoitetaan sitä, että ne vaikuttaisivat

hydraulisiin suureisiin. Pohjoisesta kaivannon ali mahdollisesti tulevat vedet voivat sitä vastoin kyllä reunaesteen takia tulla ylös kaivantoon ja lisätä pois pumpattavia vuotovesimääriä. On realistista arvioida reunaestettä ja sen vaikutuksia pelkästään paikallisesti, ilman että koko alueen pohjavesivirtauksia tarvitsisi ottaa huomioon. Jos kuitenkin puhutaan reunaesteen läpi tulevasta vuotovedestä, on muistettava, että valtaosan alueen vuotovesistä odotetaan tulevan muualta.

6. Ulkoa kaivantoon tuleva virtaus: sade

Reunaesteen läpi sisään virrannee pääasiassa vain sadevesiä, sateen aikana ja sen jälkeen. Muuna aikana sisäänvirtausta ei tapahdu, vaan kallio kuivuu ja pohjaveden pinta laskee mahdollisesti alle kaivannon pohjaveden. Tällöin virtauksen suunta kääntyy sisältä ulospäin, kuva 2.

Vuotovesien ylärajaa voisi arvioida niin, että reunaesteen takana olevan 10 m:n kaistaleen keräämä koko sademäärä valuisi kaivantoon. Jos vuotuinen sademäärä olisi 1 m, olisi silloin kertyvä vuotovesi luokkaa 10.000 m³/a. Jos vuorokautisen rajuhkon sateen sademäärä olisi 10 mm, olisi silloin kertyvä vuotovesi luokkaa 100 m³/vrk.

Oletetaan, että sateen aikana kallio täyttyy kokonaan vedellä ja vedenpintojen ero virtausesteen eri puolilla on suuri, idässä aina 10 m:iin asti. Siitä aiheutuva hydraulinen gradientti virtausesteen yli voi olla jopa 10 virtausesteen paksuudesta riippuen. Jos virtausesteen tiiviys olisi tasaisesti 10⁻⁹ m/s, olisi esteen läpi virtaavan vuotoveden määrä vastaavasti 1..10 m³/vrk ja 100..1000 m³/a. Tällöin on huomioitu läntinen maasto matalana ja itäinen maasto korkeana, missä itäisen korkean maaston osuus vuotovirtaamasta olisi 75%. Tasaisella, homogeenisella vedenjohtavuudella 10⁻⁸ m/s vuotovesimäärät olisivat edelliseen verrattuna kymmenkertaiset.

Kun em. lukuja verrataan mahdolliseen vuorokautiseen sademäärään, todetaan, että ne ovat samaa luokkaa. Vuotovesia ei niin muodoin juuri enempää voisi tullakaan. Tällöinkin oli oletettu, että koko sademäärä imeytyy kallioon, mikä ei luultavasti ole totta ainakaan rajujen sateiden sattuessa, jolloin imeytyminen jää mahdollisesti alle 1%.

Viättävässä rinteessä oleva kalliokaivannon seinämä rajaa koko virtausesteen matkalta rajoitetun kalliojärjen, kuva 2, järjen koon vaihdellessa paaluluvun mukaan. Kuivissa oloissa sellainen kärki kuivuu kokonaan. On mahdollista, että vähäisten sateiden aikana järkeen ei ehdi imeytyä merkittäviä määriä sadevettä, niin että kieleke pysyy kuivana. Kallioperän tiiviyydestä riippuen imeytyminen voi olla vähäistä myös suurempien sateiden aikana, jolloin valtaosa sadevedestä virtaa kaltevaa kalliopintaa pitkin pois alueelta. Virtausesteen alueella ei näytä olevan myöskään merkittäviä sadevettä kerääviä altaita, jotka edesauttaisivat imeytymistä. Mikäli kalliojärki pysyy osittainkin kuivana, niin ettei yhtenäistä vesipatsasta synny, pienenevät kaikki yllämainitut vuotovesimäärät murtoosiinsa.

Yhteenvetona ulkoapäin kaivantoon virtaavasta vuotovedestä todetaan, että se jää mahdollisesti enimmillään 1000 m³:een vuodessa, eikä määrä välttämättä juurikaan riipu virtausesteen tiiviyydestä, jos vuotoon tarvittavaa vettä ei ole enempää tarjolla.

Yhteenvetona sateen osuudesta vuotovesiin todetaan, että mahdollisesti kaikki virtausesteen läpi ulkoa kaivantoon tuleva vesi on peräisin välittömästä sateesta. Sen määrä on kuitenkin häviävän pieni koko kaatopaikka-alueen sadekertymästä. Estämällä sateen imeytyminen kallioperään virtausesteen ulkopuolella sen välittömässä läheisyydessä voidaan vähentää virtausesteen läpi tulevaa vuotovettä.

7. Kaivannosta ulos lähtevä virtaus: kaatopaikan jätevedet

Silloin kun pohjaveden pinta on kaivannossa korkeammalla kuin ympäristössä, virtaus suuntautuu kaivannosta ulos. Jotta kaivannossa olevaa kaatopaikan jätevettä ei pääsisi ulos ympäristöön, olisi pohjaveden pinta pidettävä kaivannossa ympäristöä alempana tai ympäristössä kaivantoa ylempänä. Muussa tapauksessa virtausta tapahtuu. Jos kaivannon vedenpinta ylläpidetään pumppaamalla pohjatasossa, vuotovirtaus tapahtuu kaivannon pohjan kautta, pystyseinämän virtausesteen ollessa passiivinen. Jos kaivannon vedenpinta nousee, virtausta tapahtuu myös pystyesteen läpi.

Jos kaivannossa on vettä raskaampaa nestettä, se pyrkii painumaan veden alle. Raskas neste virtaa kaivannosta ulos, vaikka vedenpinta ulkona olisi kaivantoa korkeammalla. Vedenpinnan säätely on tehoton keino kaivannon pohjan virtauksen hallitsemiseksi, jos kaivanto sisältää vettä raskaampia nesteitä. Ainoa keino vähentää vettä raskaamman jäteveden pääsyä kallioperään on pohjan tiivistäminen.

Jos vedenpinta kaivannossa pidetään pohjassa, pystyseinän virtausesteen tiiviydellä on merkitystä vain alaosissa. Missään oloissa virtauseste ei voi olla niin tiivis, ettei se läpäisis yhtään jätevesiä.

Yhteenvetona jätevesien vuotamisesta todetaan, että jos kyseessä on vettä raskaampia nesteitä, niiden vuotamista voidaan vain hidastaa, mikä tapahtuu tiivistämällä, mutta vuotamista ei voi kokonaan estää. Jos kyseessä on vettä kevyempiä tai samanpainoisia nesteitä, vuotaminen voidaan estää kokonaan hydraulisella esteellä, josta on esimerkki kuvassa 3.

8. Pystyseinämän virtausesteestä

Pystyseinämä on ajateltu tiivistää injektioimalla. Toimenpiteellä on vaikutusta kaatopaikan jätevesien ulosvirtauksen hidastamisessa. Ratkaisevassa asemassa on tällöin tiivistyseinän alaosa, joka on kaatopaikan pohjavesien alapuolella. Jos kaatopaikassa on vettä raskaampia nesteitä, tiivistys on ainoa keino vuotamisen hidastamiseksi.

Ulkoapäin kaatopaikkaan pyrkivät vedet, lähinnä sadevedet, saattavat jäädä määrältään niin vähäisiksi, että tiivistyksellä ei välttämättä ole ollenkaan vaikutusta. Asiaan vaikuttaa olennaisesti se, kuinka paljon kallioon pääsee imeytymään sadevettä.

9. Injektointisuositus tiivistettäväksi rei'iksi

Vesimenekkikokeiden ja niiden ohessa tehtyjen muiden tarkastelujen perusteella on saatu käsitys kallioperän rikkoontuneisuudesta. Sen perusteella tehdään ehdotus injektoidamalla tiivistettäväksi vyöhykkeiksi:

- Injektoidaan kaikki läntiset matalan maaston reiät -1..19.
- injektoidaan idässä reiät 30, 34 ja 38..40..? (mahdolliset uudet reiät).

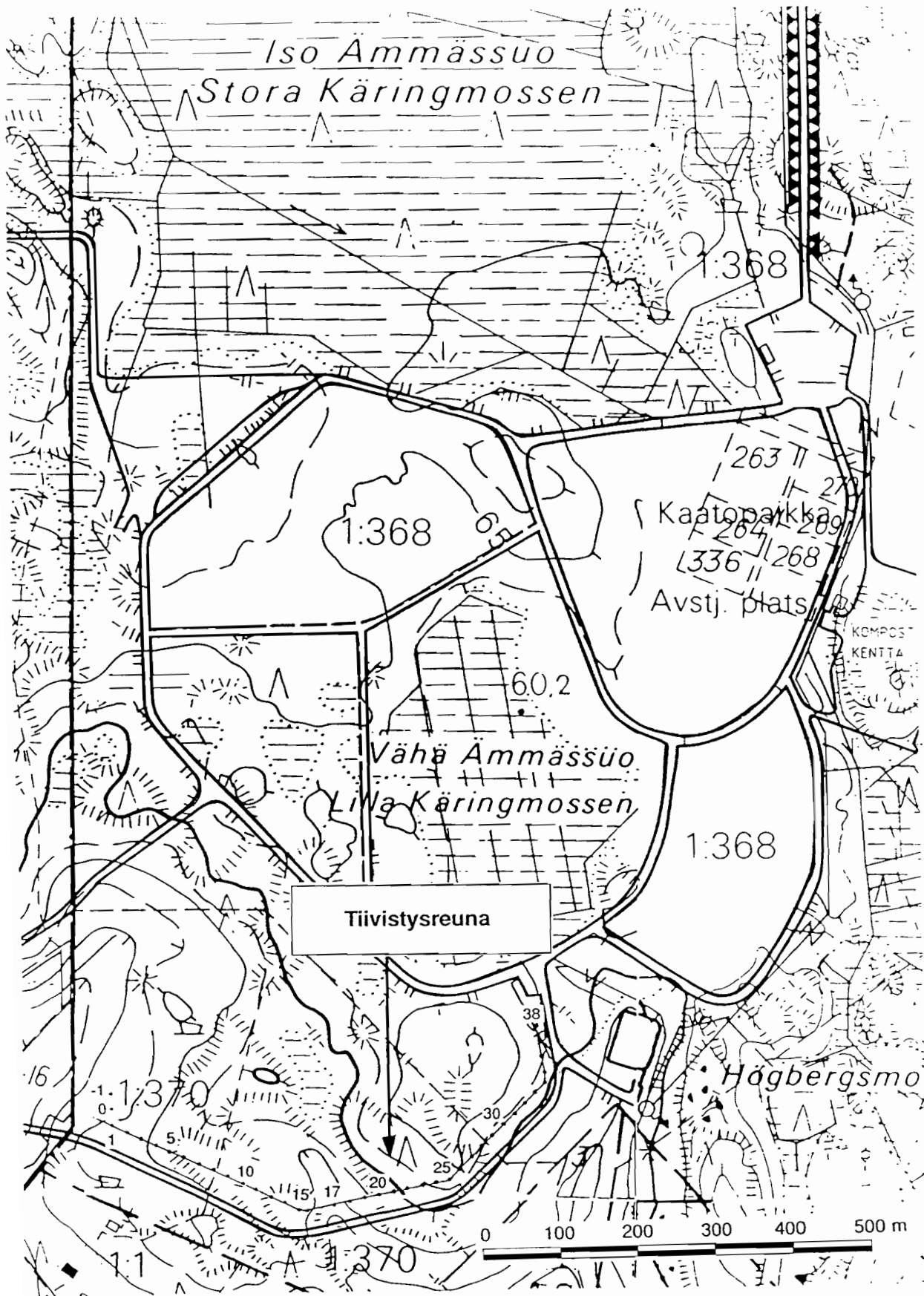
Muihin reikiin on saatu menemään vain vähäinen vesimenekki, jopa korotetulla paineella. Reiän 38 yläosaan on saatu menemään kohtalainen vesimenekki tason +54 m yläpuolella, mahdollisesti tasolla +58 m havaittuun rakoon. On mahdollista, että reikää 38 on turha tiivistää. Kun reiät ulottuvat tasolle +45 m, ja kaatopaikan pohja on tasolla +50 m, vain tason +55 m alapuoliset osuudet injektointirei'istä on mielekästä tiivistää. Sen yli menevä osuus suojaisi ainoastaan sateen vaikutuksilta, jotka on edellä arvioitu vähäisiksi.

10. Injektointipaine

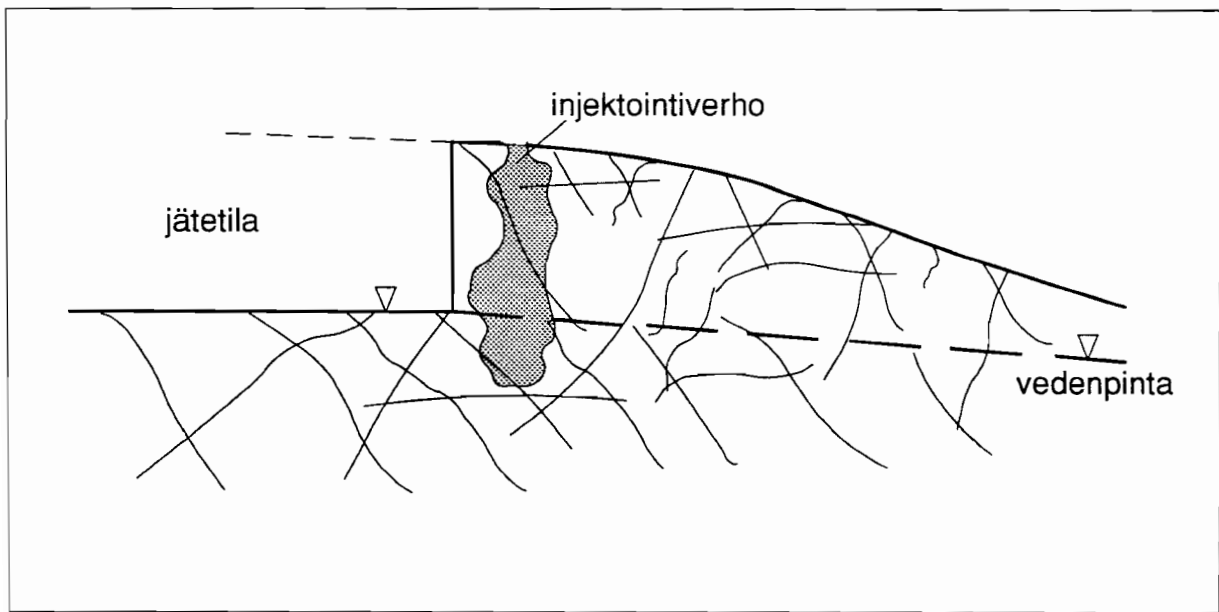
Yleisesti kallion pintaosissa vallitsee vain vähäinen pystysuora puristusjännitys. Jos injektointimassa painetaan reikään suurella paineella, se saa aikaan rakojen avautumista, ja massan tunkeutuminen helpottuu. On kuitenkin mahdollista, että injektoidaessa jotkut raot tulevat jopa entistä paremmin vettä johtaviksi. Näin käy silloin, kun injektointi aiheuttaa pysyvän ylöspäin tapahtuvan liikeyhdyksen. Parhaan kokonaistuloksen saavuttamiseksi normaalia kallion pintaosissa käytettävää injektointipainetta ei ole syytä ylittää.

Viitteet

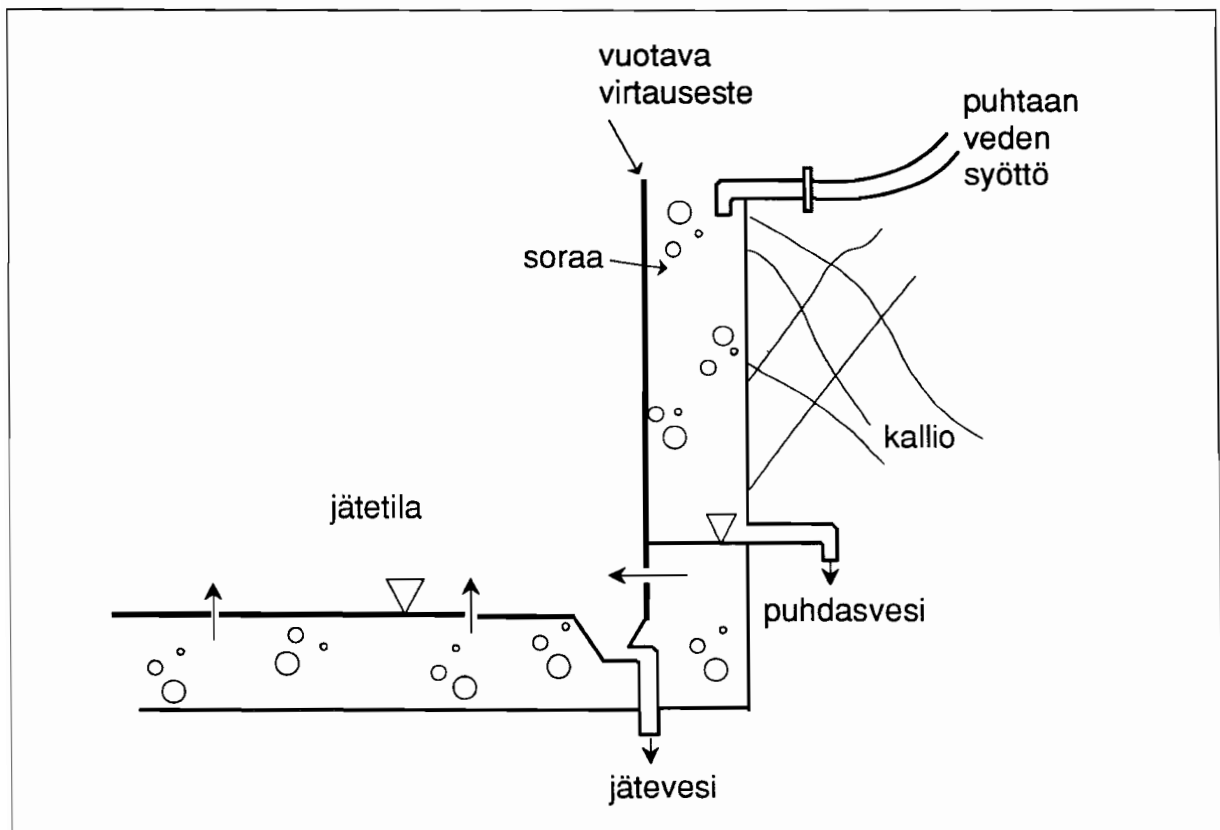
1. Ylinen, A., Ämmäsuon laajennusalueen injektointireikien videokuvaukset, VTT:n tutkimusraportti n:o VTT/TGL1520/92.
2. Pölli, J., Ylinen, A., Ämmäsuon kaatopaikan laajennusalueen kallioperän tiivistäminen / injektointireikien vesimenekkikokeet, VTT:n tutkimus 1993, valmisteilla.



Kuva 1. Ämmässuon kaatopaikan laajennusalue.



Kuva 2. Ämmäsuon kaatopaikan eteläreuna.



Kuva 3. Hydraulinen este toimii, kun jätetilassa ei ole vettä raskaampia nesteitä.

Viitteet

1. Ylinen, A., Ämmässuon laajennusalueen injektointireikien videokuvaus, VTT:n tutkimusselostus n:o VTT/TGL1520/92.
2. Pöllä, J., Ylinen, A., Ämmässuon kaatopaikan laajennusalueen kallioperän tiivistäminen / injektointireikien vesimenekikokeet, VTT:n tutkimus 1993, valmisteilla.

VANTAAN KAUPUNKI
Tekninen toimiala
Kaupunkirakentaminen / SO
Geotekniikka

Kielotie 13
01300 VANTAA

ESPOON KAUPUNKI
Tekninen virasto
Geotekniikkayksikkö

Virastopiha 2 C
02770 ESPOO

26. PETIKKO

PITKÄSUON TÄYTTÖMÄKI **I – Rakennusvaihe**

JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA – PROJEKTI **Pohjatutkimukset**

Tiina Glans-Kippilä, Jouni Mäntylä, Ossi Ikävalko

JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA -PROJEKTI:

KALLIOPERÄTUTKIMUKSET VANTAAN PITKÄSUON ALUEELLA

1 YLEISTÄ

- 1.1 Tutkimuksen tavoitteet
- 1.2 Kohteen sijainti
- 1.3 Alueen geologiaa

2 SUORITETUT TUTKIMUKSET

- 2.1 Kallioperäkartoitus
- 2.2 Porakonekairaukset
- 2.3 Vesimenekkikokeet
- 2.4 Pohjavesihavainnot

3 TULOKSET

- 3.1 Kallioperän piirteet
- 3.2 Alueen hydrologiaa
- 3.3 Kallioperän vedenjohtavuus
- 3.4 Ehdotus koekaivannoiksi

LIITTEET

- Tutkimuskohteen sijainti
- Tutkimuskartta
- Leikkauspiirrokset
- Vesimenekkimittausten tulokset

1 YLEISTÄ

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Pitkäsuon alueen kallioperätutkimusten tavoitteena oli hahmotella pääpiirteittäin alueen kallioperän rakennetta ja sen hydrologisia piirteitä. Selvitys liittyy osana laajempaa 'jätekaivanto kalliossa' projektia. Suoritettu tutkimus tullee ohjaamaan jätekaivanto -projektin jatkovaiheessa Pitkäsuon alueelle mahdollisesti louhittavien koekaivantojen sijoittamista.

1.2 Kohteen sijainti

Tutkimuskohteena oli n. 100 x 200 m² kokoinen alue, jonka sijainti on esitetty liitteessä 1.

Kallioperätutkimukset keskittyivät kahdelle kalliokumpareelle ja niiden väliin jäävälle suoalueelle.

1.3 Alueen geologiaa

Tutkimusalueen kallioperä on rapakivigraniittia. Alue kuuluu laajempaan ns. Bodomin rapakivigraniittialueeseen (liite 2). Aluetta luonnehtii loivapiirteinen kallioperä, jota verhoaa yleisesti ohut moreenipeite. Kallioharjanteiden väliin jää yleensä soisia painannealueita.

2 SUORITETUT TUTKIMUKSET

2.1 Kallioperäkartoitus

Alueella suoritettiin rakennusgeologista kartoitusta. Kartoituksella pyrittiin selvittämään kalliolaatua, rakoilun suuntia ja tiheyttä.

2.2 Porakonekairaukset

Kairauspisteiden vaaitukset ja mittaukset suoritti Vantaan kaupunki.

Tutkimuskohteessa suoritettiin Vantaan kaupungin geoteknisen toimiston toimesta kalliopinnan varmistusta kevyellä porakonekalustolla 5 työvuoron aikana. Yhteensä pisteitä kairattiin 20 kpl.

Kohteeseen suunniteltiin kairattavaksi iskuporakoneella rakennusgeologisen kartoituksen perusteella päärakoilusuuntia lävistäviä n. 20 m syviä kallioreikiä. Reikiä kairattiin Espoon kaupungin geoteknisen yksikön toimesta 6 kpl, yhteensä 140 m. Pisin reikä oli 40 m. Lisäksi suopainanteeseen asennettiin pohjavesihavaintoputki.

2.3 Vesimenekikokeet

Kairanrei'issä suoritettiin vesimenekkimittauksia yksitulppamenetelmällä. Mittauspaineina käytettiin 1, 3 ja 5 bar mittausajan ollessa 10 min. Lisäksi suoritettiin erikseen vedenläpäisevyyden arvioimiseksi veden imeyttämistä 0.1 bar paineella. Tulppa sijoitettiin aluksi 5 m:n syvyyteen reikään. Mikäli selvää vesimenekkiä oli havaittavissa, suoritettiin mittaus myös tulpan ollessa 10 m:n syvyydessä.

2.4 Pohjavesihavainnot

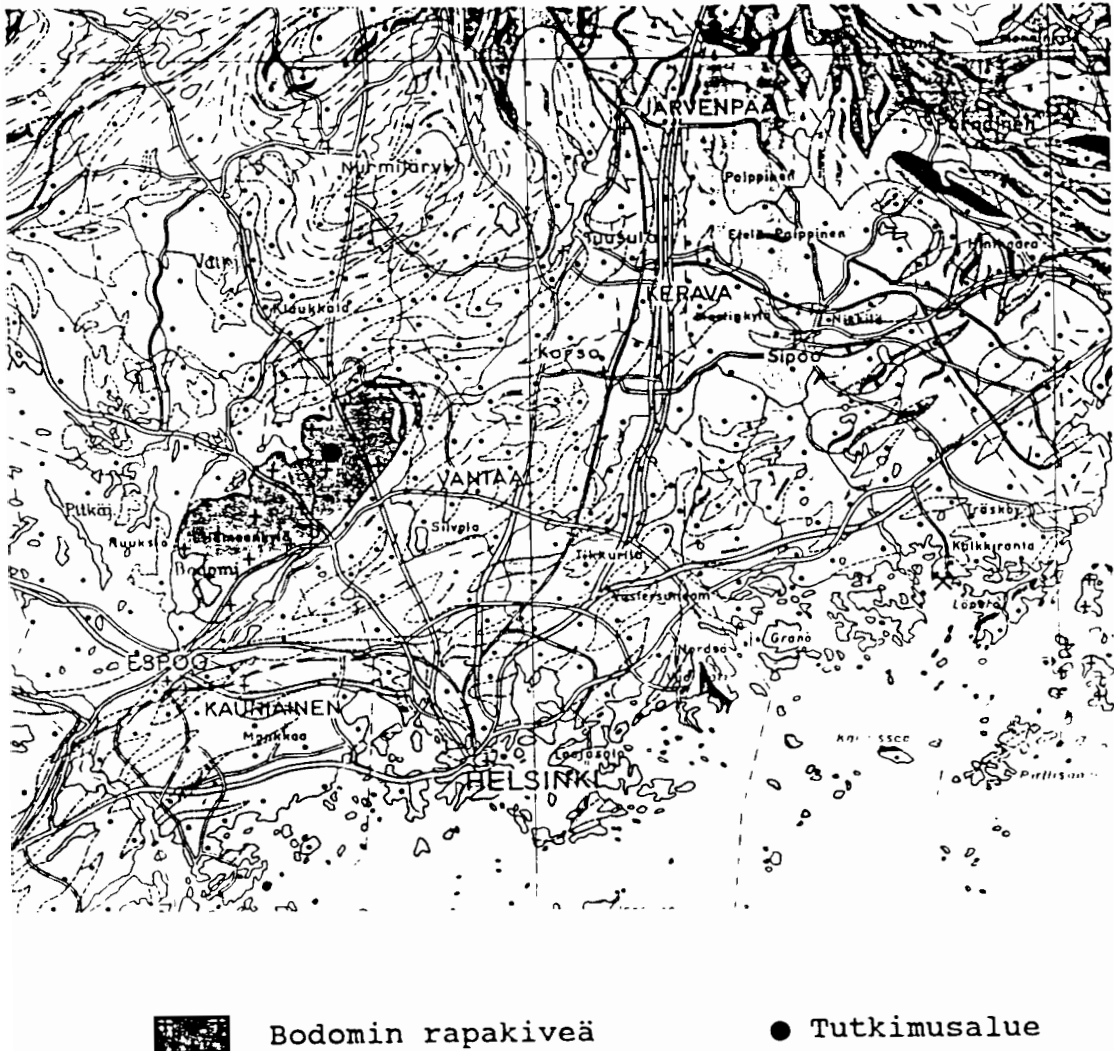
Tutkimuksen aikana alueen vesialtaissa, kairanrei'issä ja pohjavesiputkissa seurattiin veden pinnan korkeusaseman vaihtelua.

3 TULOKSET

3.1 Kallioperän piirteet

Kallioperä on tasalaatuista, keskirakeista ja punaista rapakivigraniittia. Tutkimusalue kuuluu laajaan Bodomin rapakivialueeseen, kuva 3.1.1. Rakoilultaan kivi on vähä- tai harvarakoista. Kivilaatu on täysin massamaista ja rapautumatonta, kivessä ei ole havaittavissa liuskeisuutta.

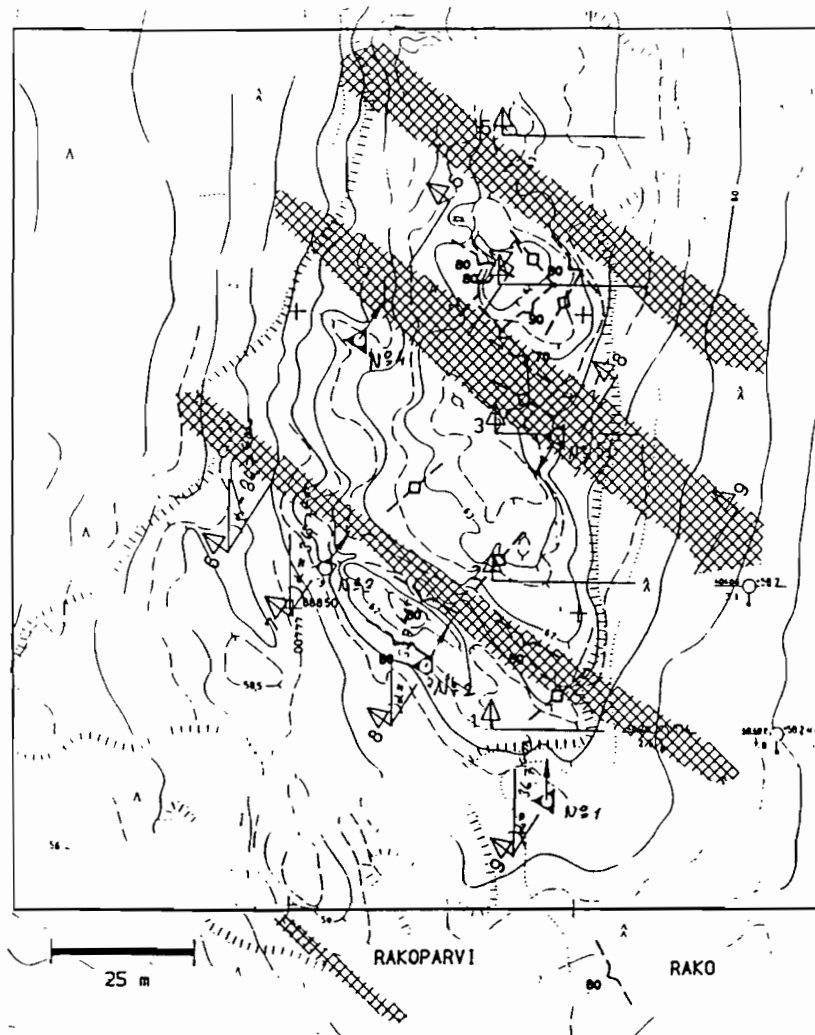
Kallioperän rakoilu on rapakiville tyypillistä kuutiollista ja yleensä harvaa niin, että rakoväli saattaa olla useita metrejä. Kuvassa 3.2 on tarkasteltu rakoilusuuntia. Vallitsevina suuntina esiintyvät koillis-lounaissuuntainen rakoilu ja luode-kaakosuuntainen rakoilu. Rakoilu on yleensä varsin pystyä, poikoin koillis-lounaissuuntainen rakoilu on loivahkoasentoista.



Kuva 3.1. Bodomin rapakivigraniitti ja tutkimusalueen sijainti. Suomen geologinen yleiskartta 1:400 000 (Geologinen tutkimuslaitos).

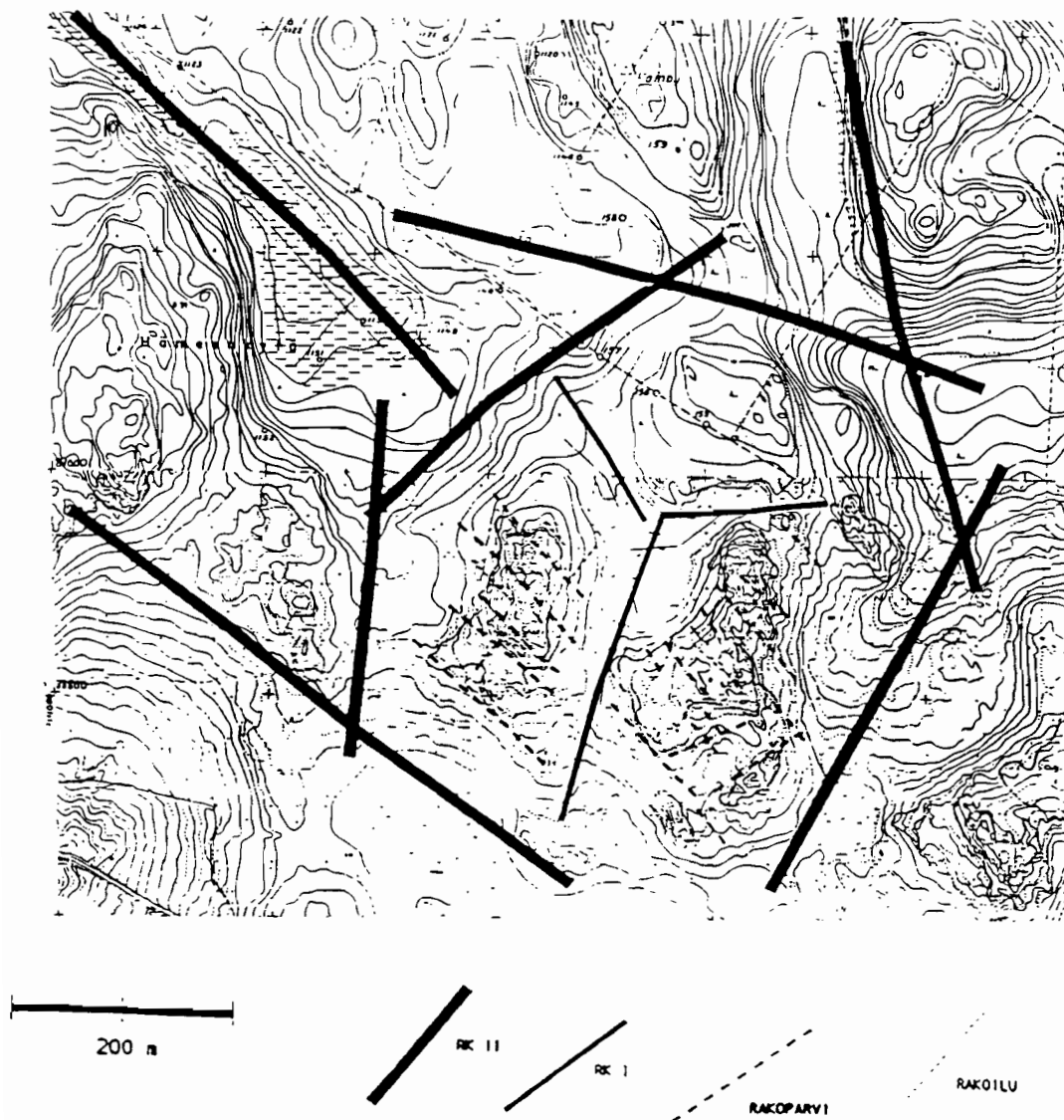
Lähialueen kalliolouhoksista on pääteltävissä, että pystytköt tai jyrkähköt (kaade yli 45°) raot ovat vallitsevia. Rapakiville tyypillistä systemaattista vaakarakoilua ei ole havaittavissa.

Paikoin luode-kaakkosuunnassa on morfologiassa havaittavissa kapeita painanteita avokallioissa. Näihin vaikuttaisi liittyvän hieman tiheämpää vastaavansuuntaista rakoilua (kutsuttu tässä rakoparviksi).



Kuva 3.2. Kallioperän rakoilu.

Kuvassa 3.3 on tarkasteltu erisuuruisia morfologiassa havaittavia lineaarisia rakenteita, jotka saattavat ilmentää erilaisia kallioperän heikkousvyöhykkeitä. Selvästi voidaan havaita päärajoituksen suuntaiset pienet painanteet (rakoparvet). Tutkimusalue sijoittuu kalliolohkoon, jota rajaavat RK2 tyyppiset rakenteet, ja jonka sisärakenteeseen kuuluvat RK1 -tyyppiset rakenteet. Kairauksessa ei saatu havaintoja RK1 -rakenteista, ne saattavat edustaa vain sopivan suuntaista loiva-asentoista rakoilua, eikä vettäjohtavaa heikkousvyöhykettä. Suurempia kauempana olevia kallioperän rakenteita (RK 2 ..jne) ei ollut mahdollisuus selvittää. On ilmeistä, että tutkimusalueelta ei löydy voimakkaasti vettä johtavia heikkousvyöhykkeitä.



Kuva 3.3. Kallioperän rakenneyksiköt.

3.2 Hydrologisia piirteitä

Kuvassa 3.4 on esitetty tutkimusalueen pintavesien valumasuunnat ja vedenjakajat. Keskeisellä alueella on havaittavissa kalliokohoumien ympäröimä loiva soinen n 1 - 2 ha:n allas, johon vedet valuvat hyvin rajoittuneelta lähialueelta. Kokonaisuudessaan kyseessä on > +55 m oleva ylänkökallioalue, johon sadevesi keräätyy paikallisiin painanteisiin, ja joista se valuu pintavesiuomia pitkin kauemmas.



Kuva 3.4. Tutkimusalueen pintavesien valumasuunnat ja vedenjakajat.

3.3 Kallioperän vedenjohtavuus

Vesimenekki- ja imeytyskokeiden perusteella kallioperä on hyvin heikosti vettä läpäisevää. Taulukossa 3.1 on arvioitu tutkimusalueella havaittujen rakenteiden vedenjohtavuuksia. Vedenläpäisevyyskertoimia määritettäessä on oletettu, että yhtä Lugeonia vastaa likimäärin vedenläpäisevyys $k = 10^{-7}$. Pääsääntöisesti kallioperän vedenjohtavuus on luokka $k = 10^{-8} \dots 10^{-9}$, mikä ei riitä johtamaan sadevettä kallioperään. Sadevesi kasautunee altaiksi (orsivedeksi) kallion päälle, mistä ovat osoituksena suo- ja vesialtaat.

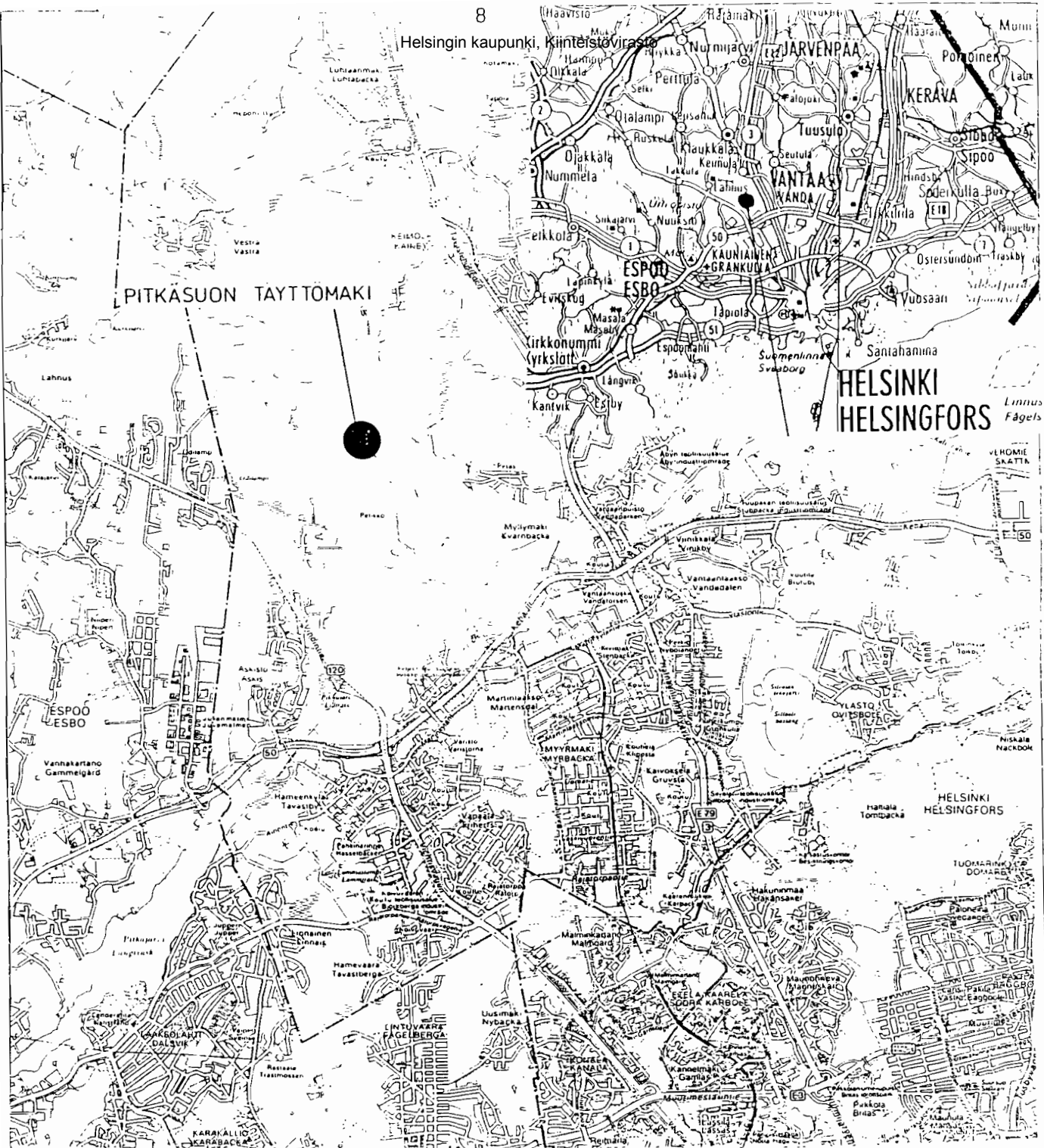
Suurin arvioitu vedenjohtavuus oli luokkaa $10^{-6} \dots 10^{-7}$, mikä liittyyneen yksittäiseen rakoon.

Taulukko 3.1. Kallioperän rakenteet ja arvio vedenjohtavuudesta.

Rakenne	Kuvaus	k-arvo, m/s
Rakoilu	Yleensä rakoilu	$10^{-8} \dots 10^{-9}$
	Satunnaiset raot	$10^{-6} \dots 10^{-7}$
Rakoparvi	Harvat rakoparvet	10^{-7}
RK2	Lohkon sisäiset rakenteet	ei havaittu
RK2	Lohkoa rajaavat rakenteet	ei tutkittu
RK3	Suuret alueelliset rakenteet	ei tutkittu

3.4 Ehdotus koekaivannoiksi

Liitteenä olevassa tutkimuskartassa on esitetty kaksi $25 \times 25 \text{ m}^2$ aluetta, joille voisi louhia koekaivantoja jatkotutkimuksia varten. Toinen kaivanto sijaitsisi kallioselänteellä ja toinen osaksi suopainanteella. Kallion heikosta vedenjohtavuudesta johtuen koekaivannot täyttynevät sade- ja valumavesistä. Kaivannot pysynevät varsin kuivina, mikäli pintavesien valuminen niihin estetään.



VANTAAN KAUPUNKI
RAKENNUSVIRASTO
 Kunnallistekninen ryhmä

12.08.1993

Hyv

Tark

Suunn./Pari

J. Mäntylä

/TG-K

26

PETIKKO

PITKASUON TAYTTOMAKI

I- RAKENNUSVAIHE

JATEKAIVANTO KALLIOSSA

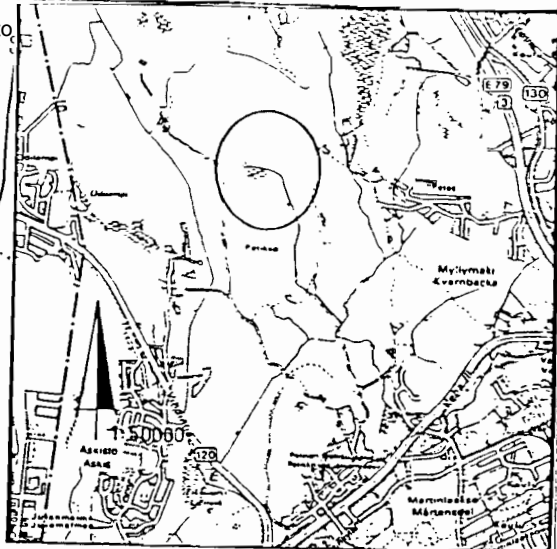
TUTKIMUSKOHTIEN SIIJAINTI
 Geotekninen osasto julkaisu 63

Mittakaava

1 : 500 000

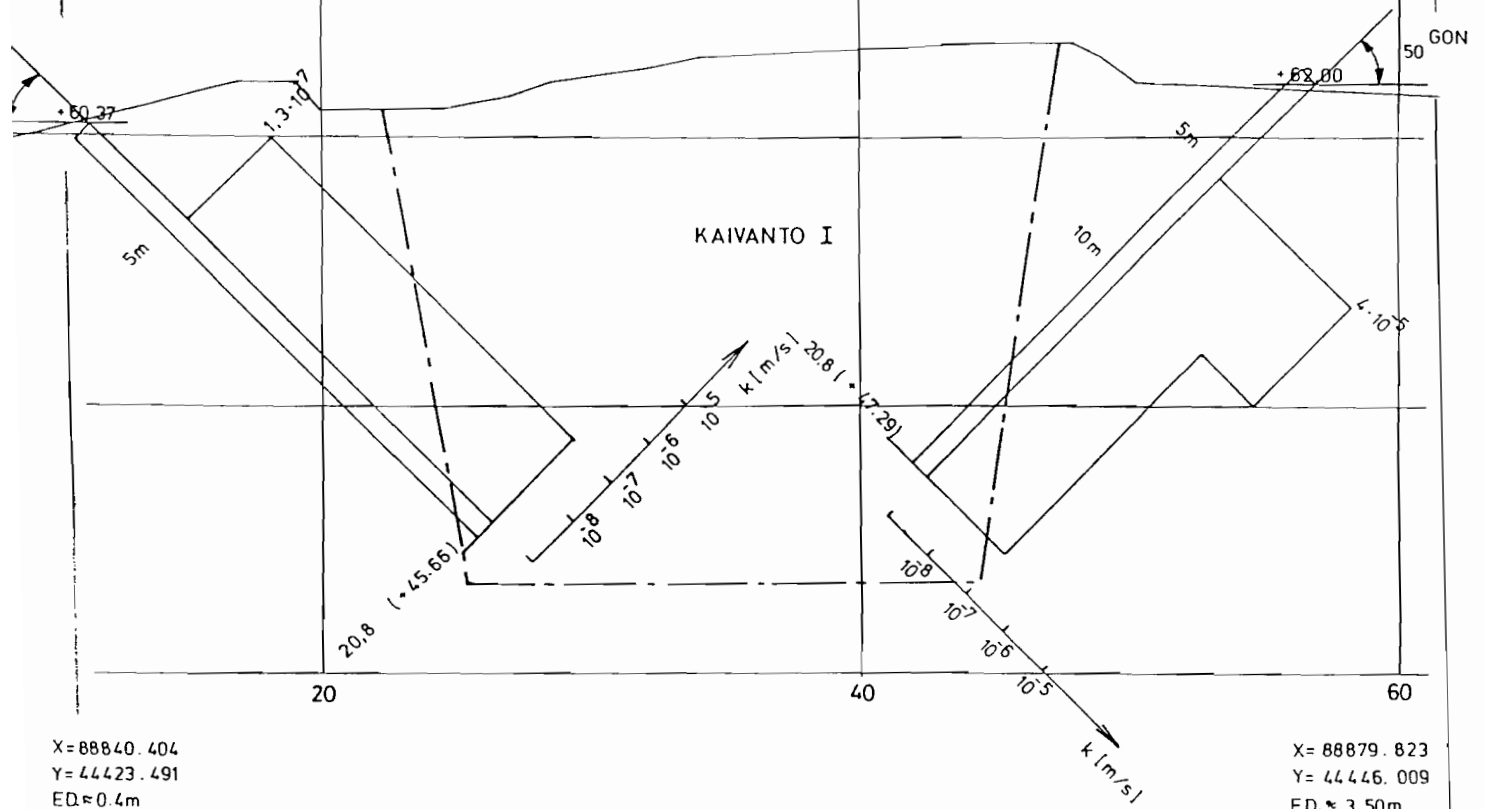
1 : 50 000

Liittyy per n:o



 Espoon kaupunki Tekninen virasto Geotekninen osasto	Esbo stad Tekniska verket Geotekniska avdelningen	Suhde	N:o
JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA - PROJEKTI		Tutk.	
		Piirt.	
		Suunn.	
		Hyv.	OSSI IKÄVALKO
 VANTAAN KAUPUNKI RAKENNUSVIRASTO Kunnallistekninen ryhmä		Hyv.	
		Tark. OSSI IKÄVALKO	
12.08.1993		Suunn./Piirt. <i>1. kerran</i>	/TG-K
26	PETIKKO PITKÄSUON TÄYTTÖMAKI I-RAKENNUSVAIHE JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA Geotekninen osasto julkaisu 63	Mittakaava 1: 200 / 1:200	Lisäyksiä n:o 28 525 - 28 533

LEIKKAUS 8-8



VANTAAN KAUPUNKI
RAKENNUSVIRASTO
Kunnallistekninen ryhmä

Hyv
Tark
OSSI IKÄVALKO
Suunn./Piet
11.08.1993
1.000000 /TGK

26 PETIKKO
PITKÄSUON TÄYTTÖMAKI
I-RAKENNUSVAIHE
JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA
LEIKKAUS 8-8

Mittakaava
1:200 / 1:200

Lisäyksen n:o
28 524- 28 531
28 533

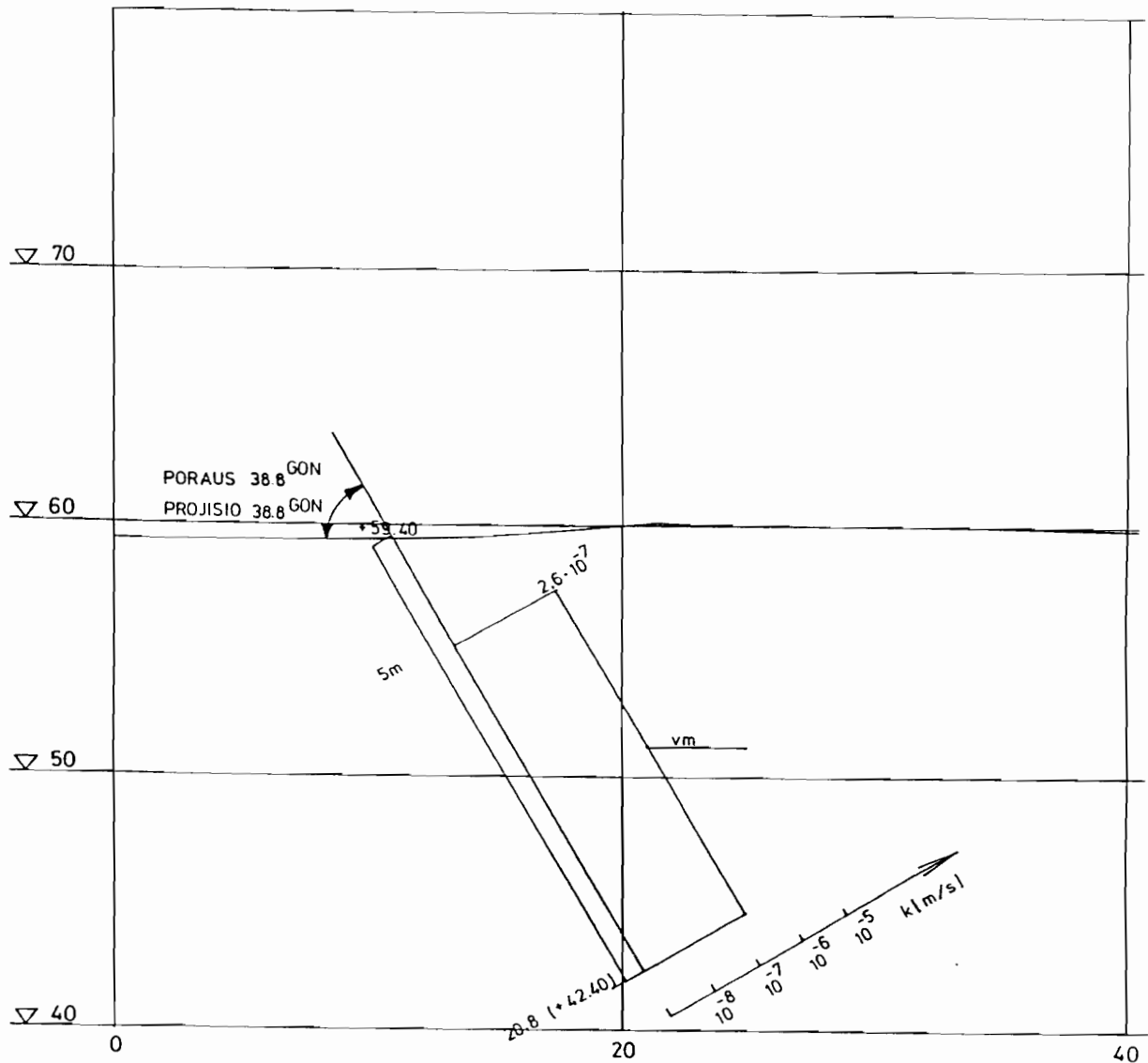
71 YLIIKKAAMAKOULUN OSAKUNNAN KÄSITTELY

Hyv
Vahv
Hyv
Hyv

Vahv
Piet n:o

28 532

LEIKKAUS 9-9



X= 88817.873
Y= 44444.893

 VANTAAN KAUPUNKI RAKENNUSVIRASTO Kunnallistekninen ryhmä		Hyv
		Tark OSSI IKAVALKO Suunn./Pien 11.08.1993 /TG-K
26	PETIKKO PITKÄSUON TÄYTTÖMÄKI I-RAKENNUSVAIHE JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA LEIKKAUS 9-9	Mittakaava 1:200 / 1:200 Leveys p:n o 28 524 - 28 532
71	YLIJAAMAMAIDEN SIIJOITUSSUUNNITELMA Geotekninen osasto julkaisu 63	Hyv Vahv Hyv Hyv Vahv Pien n:o 28 533

Espoon kaupunki
 Tekninen keskus
 Geotekniikkayksikkö/O.Ikävalko
 LISTA
 18.5.1993

Vantaan Pitkäsuon alueella suoritettut kairaukset:

No	x	y	z	syvyys	suunta	kulma	tulppa m	vesimenekki 0.1 0.3 0.5 MPa	Lugeonia	vedenläp. k (m/s)
R 1				20.70	0	55	5	4 1 1	0.25	2.5 10 ⁻⁸
R 2				20.80	30	45	5	2 1 1	0.12	1.2 10 ⁻⁸
R 3				20.80	30	45	2.3	18.5 4.9 2.1	1.0	1.0 10 ⁻⁷
R 4				20.80	30	60	5	0 0 0	0	
R 5				20.80	210	60	5	34 124 216 (0.3 MPa)	6.8	6.8 10 ⁻⁷
								(0.5 MPa)	8.2	8.2 10 ⁻⁷
								7 10.2	8.6	8.6 10 ⁻⁷
							10	2	0.2	2.0 10 ⁻⁸
R 6				40.80	0	90	10	1.3 9.2 9.5	4.2 10 ⁻²	4.2 10 ⁻⁹

Geotekninen osasto

MALMIN ASEMATIE 3A, 00700 HELSINKI

puh. 351081

fax. 35108200

Havukainen/JHa

Helsinki 07.10.1993

VUOSAAREN KALLIOKAIVANTOTUTKIMUKSET

1. Yleistä

Vuosaaren alueen kallioperätutkimusten tavoitteena oli hahmotella pääpiirteittäin alueen kallioperän rakennetta ja sen hydrologisia piirteitä. Selvitys liittyy osana laajempaa 'jätekaivanto kalliossa' projektia. Suoritettu tutkimus tullee ohjaamaan jätekaivanto -projektin jatkovaiheessa Vuosaaren alueelle mahdollisesti louhittavien koekaivantojen sijoittamista.

Helsingin kaupunki osoitti Vuosaaren täyttömäen pohjoispuolelta noin 2 ha koealueen projektia varten. Koealueen sijainti on esitetty kuvan 1 karttapiirustuksessa.

Alueella on tehty pintavaaitus keväällä 1993 ja porakonekairauksia (9 kpl) kesällä 1993. Kaikista porarei'istä on tehty vesimenekkimittaus yksitulppamenetelmää käyttäen. Tutkimuspisteet on esitetty karttapiirustuksessa, kuva 2. Tutkimusta on täydennetty syksyllä 1993 tehtävillä kallionäytekairauksilla ja vesimenekkimittauksilla.

Lisäksi alueella suoritettiin rakennusgeologista kartoitusta. Kartoituksella pyrittiin selvittämään kalliolaatua, rakoilun suuntia ja tiheyttä.

2. Pohjasuhteet

Kuvassa 3 on esitetty rakennusgeologinen kartta tutkimusalueesta.

Alueen maanpinta vaihtelee tasojen noin +13,5 ja +27,0 välillä. Alueen länsiosassa on pohjois-eteläsuuntainen notkelma, jonka molemmiin puolin maanpinta kohoaa länsireunalle noin tasoon +16,0 ja idässä noin tasoon +27,0. Alue on kallioaluetta, jossa kallionpinta on suurimmaksi osaksi paljas tai ohuen (alle 0,5 m) humuspitoisen pintamaakerroksen peittämä. Notkelman kohdalla on päällimmäisenä kerroksena turvetta 0,5...1,0 m ja tämän alla hiekkaa ennen kallionpintaa. Pohjavedenpinta on notkelmassa likimäärin maanpinnassa ja mäkialueilla yli 1m syvyydellä maanpinnasta. Pintavaaituksen ja pohjatutkimuksen tulokset on esitetty kuvassa 2.

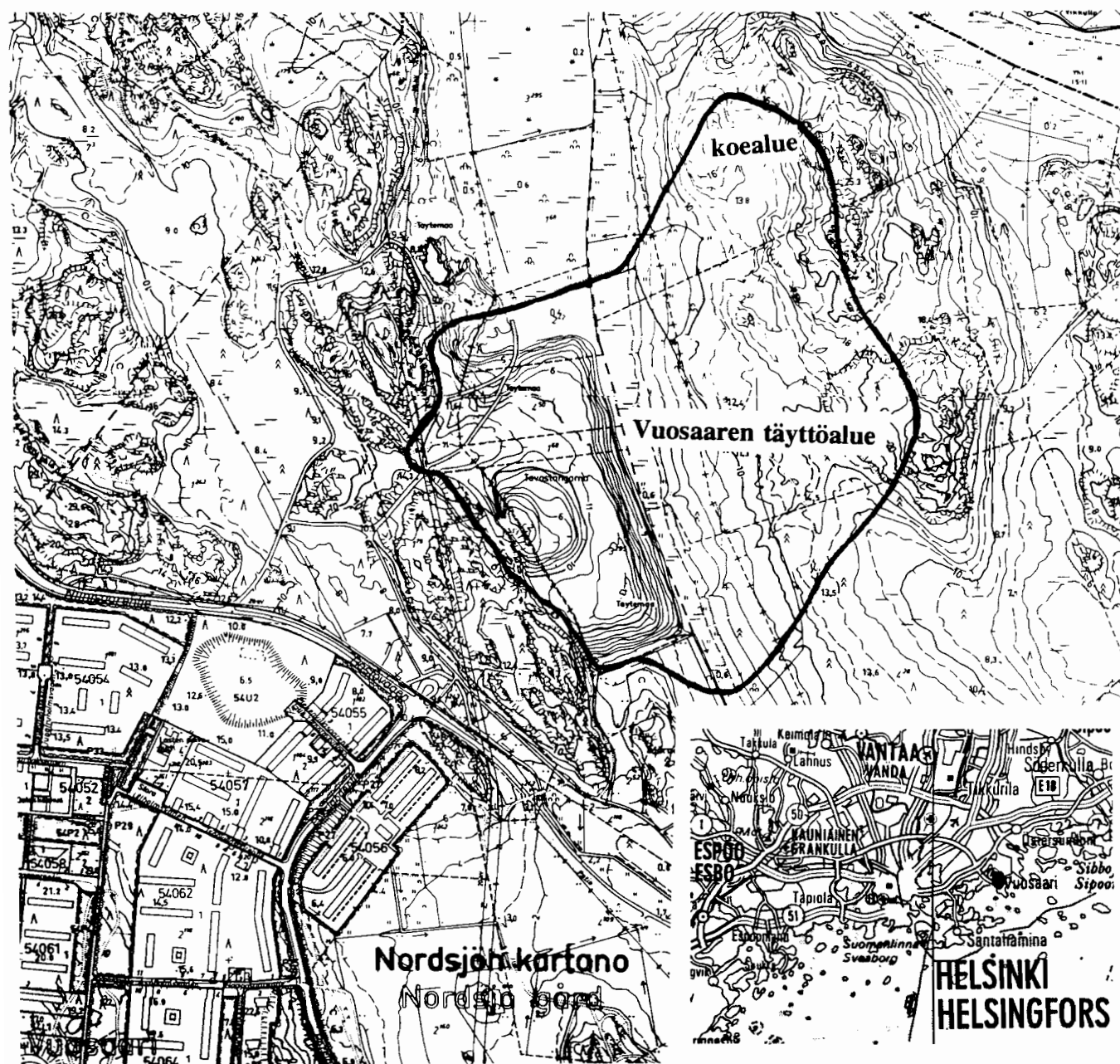
Tutkimusalueen kallioperä on kvartsimaasälpägneissiiä ja kiillegneissiiä, ja edustaa tyypillistä pääkaupunkiseudun kohtalaisesti liuskeista ja vähärakoista kalliota. Pinnanmuodotukseltaan tutkimusalue on loivahkopiirteistä kalliomaastoa. Tutkittavan kalliomäen länsireuna rajautuu NNW -suuntaiseen savikkopainanteeseen, joka edustaa kallioperän heikkousvy

3. Vesimenekikokeet.

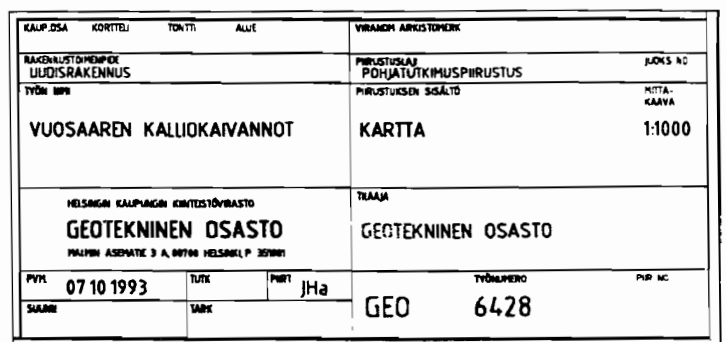
Kallio on kairausten ja vesimenekikokeiden perusteella yleensä heikosti vettä johtavaa. Vesimenekit olivat kairarei-issä yleensä huomattavasti alle 1 l reikämetriä kohden minuutissa. Suurin vesimenekin määrä oli 2 bar:n paineella n. 0.3 l/min.

4. Kalliokaivannot

Kartapiirustuksessa kuvassa 2 on esitetty koekaivantojen sijainti. Niiden tarkempi suunnittelu tehdään projektin seuraavassa vaiheessa.

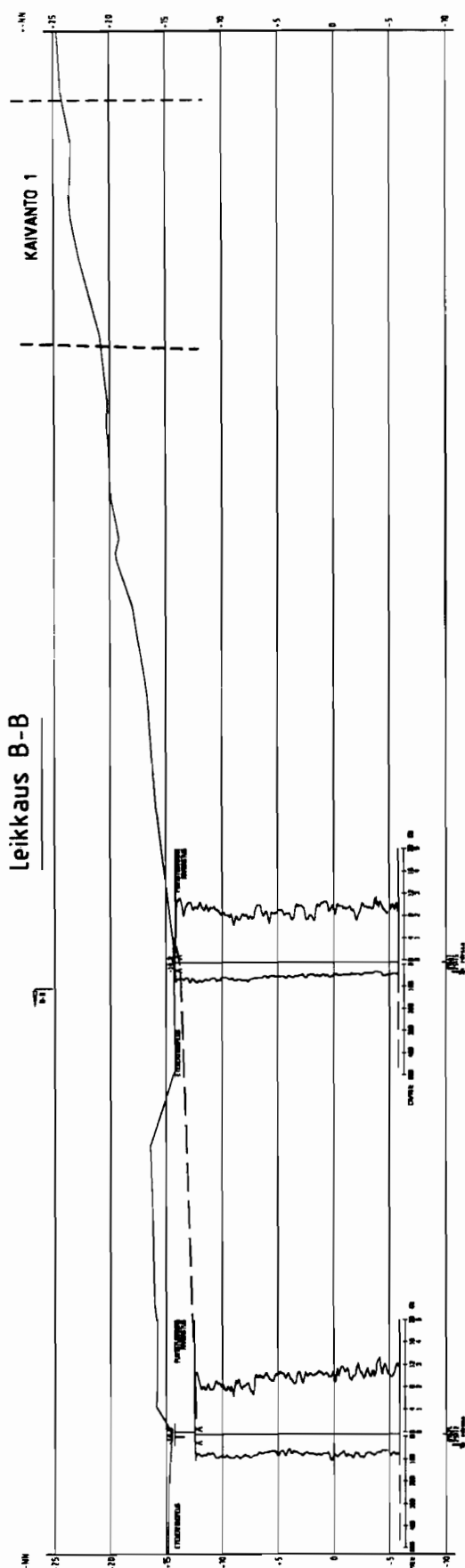
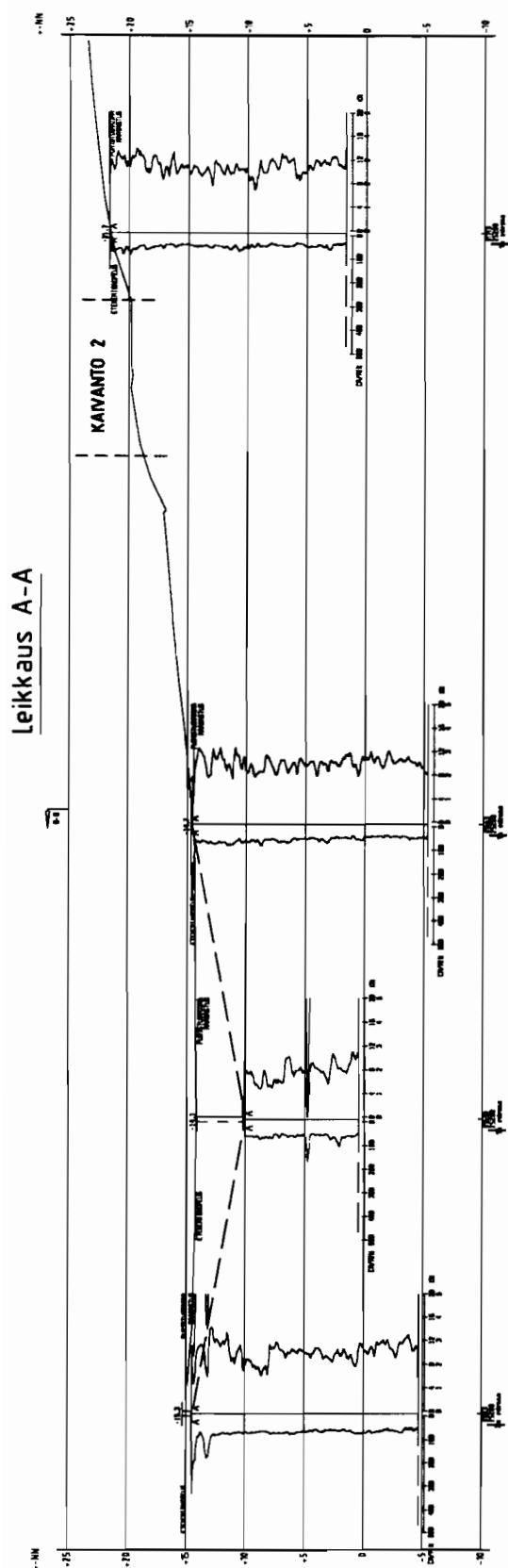


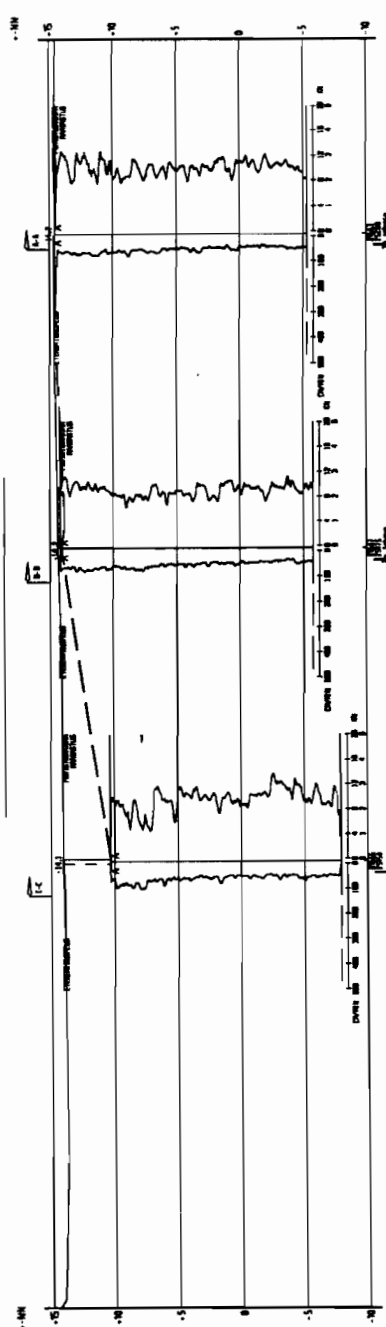
Kuva 1. Vuosaaren tutkimusalueen sijainti



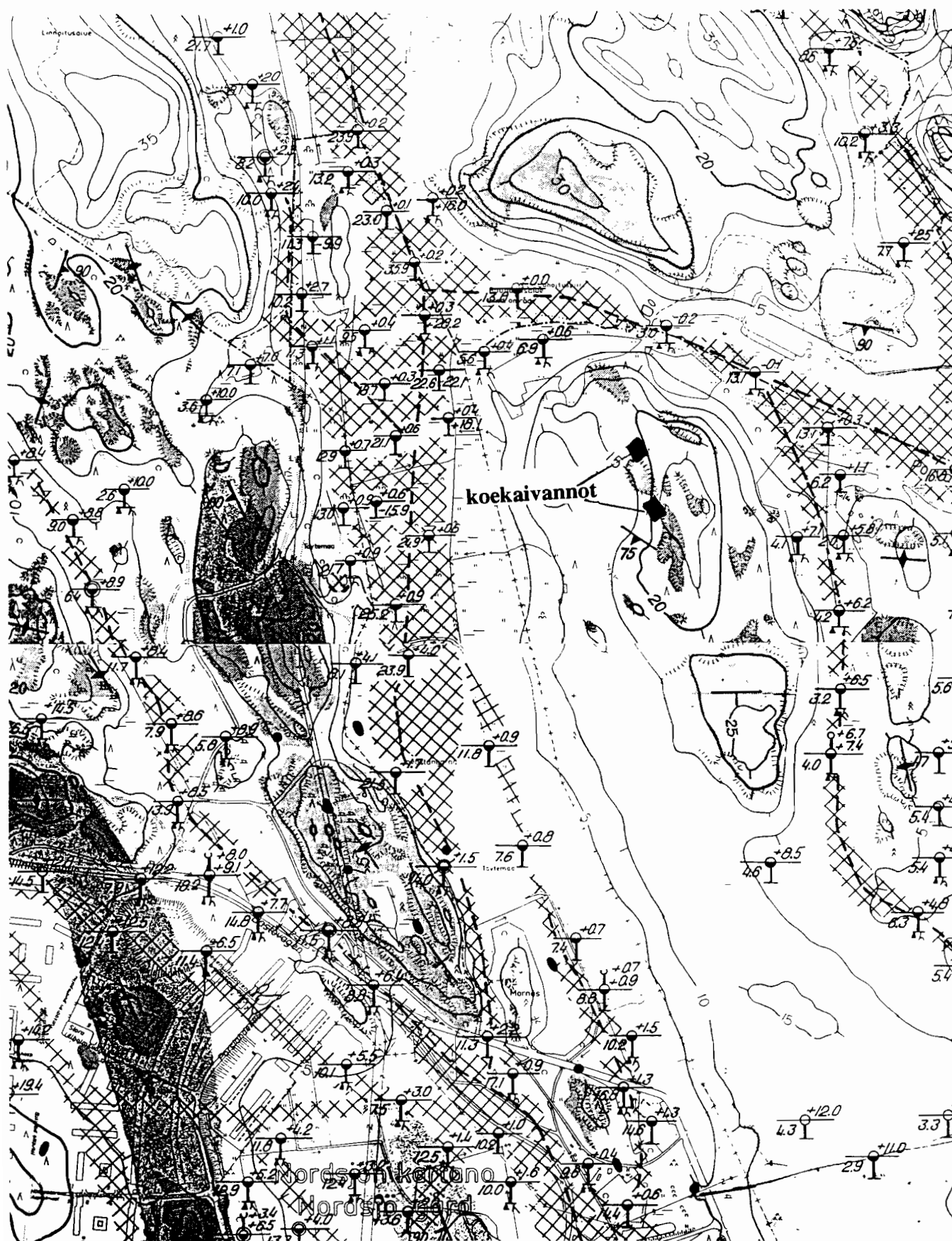
Geotekninen osasto julkaisu 63

Liite 1. Leikkauspiirroksia

[illegible]



ALUE	OSASTO	1971	S.2	MAKSIKKO	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	2116	2117	2118	2119	2120	2121	2122	2123	2124	2125	2126	2127	2128	2129	2130	2131	2132	2133	2134	2135	2136	2137	2138	2139	2140	2141	2142	2143	2144	2145	2146	2147	2148	2149	2150	2151	2152	2153	2154	2155	2156	2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171	2172	2173	2174	2175	2176	2177	2178	2179	2180	2181	2182	2183	2184	2185	2186	2187	2188	2189	2190	2191	2192	2193	2194	2195	2196	2197	2198	2199	2200	2201	2202	2203	2204	2205	2206	2207	2208	2209	2210	2211	2212	2213	2214	2215	2216	2217	2218	2219	2220	2221	2222	2223	2224	2225	2226	2227	2228	2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248	2249	2250	2251	2252	2253	2254	2255	2256	2257	2258	2259	2260	2261	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272	2273	2274	2275	2276	2277	2278	2279	2280	2281	2282	2283	2284	2285	2286	2287	2288	2289	2290	2291	2292	2293	2294	2295	2296	2297	2298	2299	2300	2301	2302	2303	2304	2305	2306	2307	2308	2309	2310	2311	2312	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331	2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343	2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367	2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379	2380	2381	2382	2383	2384	2385	2386	2387	2388	2389	2390	2391	2392	2393	2394	2395	2396	2397	2398	2399	2400	2401	2402	2403	2404	2405	2406	2407	2408	2409	2410	2411	2412	2413	2414	2415	2416	2417	2418	2419	2420																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Uudisalahti	Uudisalahti																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			</



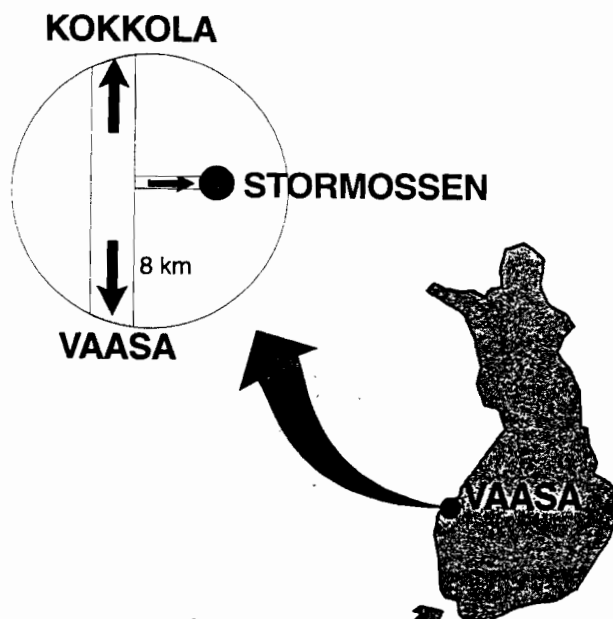
Kuva 3. Tutkimusalueen rakennusgeologinen kartta.

JÄTEKAIVANTO KALLIOSSA -PROJEKTI

STORMOSSENIN KALLIOKAIVANNOT

1. Yleistä

Mustasaaren kunnassa Vaasasta 8 km pohjoiseen sijaitsee Stormossenin jätteenkäsittelylaitos. Alueelle on louhittu suuri kalliokaivanto, josta kiviaines on murskattu. Kalliokaivantoa tullaan täyttämään jätteillä. Yhteensä on louhittu n.2 milj. m³ tasoon -20 m.

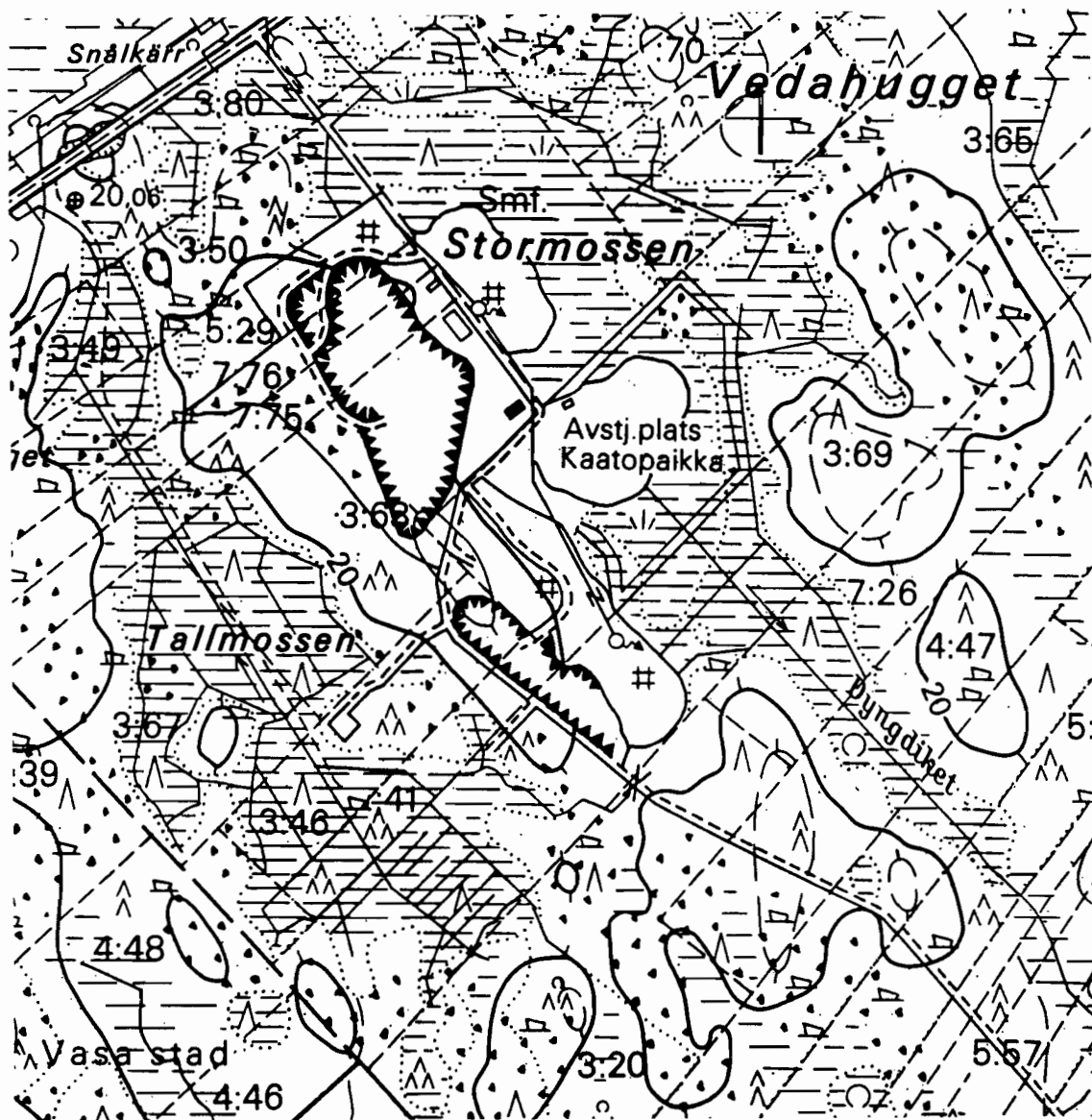


Kuva 1. Stormossenin sijainti.

2. Mustasaaren Stormoosenin alueen kallioperästä

Stormossenin alue Vaasan seudulla edustaa topografialtaan loivaa kallioaluetta, jossa korkeusvaihtelut ovat vähäisiä. Stormossenin jätekaivanto on louhittu tyypilliseen Vaasan alueen karkeaporfyryriseen graniittiin tai granodioriittiin. Kiveä luonnehtii lievä pilsteisyys tai liuskeisuus, tummahkonharmaa väri sekä suuret, halkaisijaltaan n. 2 - 5 cm olevat maasälpähajarakeet. Kallioulouhosten sijainti ja alueen topografia on esitetty kuvassa 2.

Stormossenin graniitti on hyvin harvarakoista, yhtenäiset kalliolohkot ovat usein m^3 :n luokkaa ja muodoltaan kuutiomaisia. Pystyraot ovat pitkiä, ja avonaisina niihin vaikuttaa liittyvän louhoksessa vesivuotoja.



Kuva 2. Stormossenin alueen kalliokaivannot, mittakaava n. 1: 10 000.

3. Jatkotutkimukset

Stormossenin avolouhos tarjoaa hyvän mahdollisuuden louhokseen vuotavan veden tarkkailuun. Kohteessa voitaisiin selvittää vuotovesimäärät, kartoittaa vettäjohtavat rakenteet, arvioida kalliopohjaveden liikkeitä laajemmalla alueella jatutkia mahdollisella kallioperätutkimuksella saatavan hydrologisen mallin paikkaansapitävyyttä. Lisäksi kohde tarjoaa hyvät mahdollisuudet erilaisten jälkiseurantajärjestelmien kehittämiseen (instrumentointi).

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

12,10,93

1 Anttikoski, U.	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	Suomi	1973
2 Anttikoski, U.	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1973 *
3 Anttikoski, U.	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1974 *
4 Mäkinen, R.	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	Suomi	1974 *
5 Saarelma, M.	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	Suomi	1974 *
6 Saarelma, M.	Kitkapaalujen kantavuus	Suomi	1976
7 Petäjä, J.	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	Suomi	1977
8 Raudasmaa, P.	Metrotunnelien injektointi	Suomi	1977 *
9 Anttikoski, U.	Kalliotunnelien käyttö varastointiin	Suomi	1977 *
10 Tikkanen, H.	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	Suomi	1978
11 Arkima, O.	Kluuvien ruuhkan jäädys	Suomi	1978 *
12 Raudasmaa, P.	Puiset perustusrakenteet	Suomi	1979
13 Havukainen, J.	Voimalalaitostuhtaan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	Suomi	1979
14 Vähäaho, I.	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	Suomi	1979 *
15 Raudasmaa, P.	Pohjavesitarkkailu -80	Suomi	1980
16 Anttikoski, U.	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	Suomi	1979 *
17 Roinisto, J.	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneliin	Suomi	1981
18 Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	Suomi	1981 *
19 Roinisto, J.	Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys	Suomi	1981
20 Vuola, P.	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	Suomi	1981
21 Havukainen, J. & Korhonen, O.	Tonttialueiden maarakenteet	Suomi	1981
22 Havukainen, J.	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	Suomi	1981
23 Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	Suomi	1982
24 Latvala, A.	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	Suomi	1982
25 Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Sulamäki, A.	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	Suomi	1982
26 Halkola, H.	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä	Suomi	1982 *
27 Paavola, P.	Kunnallisteknisten tunnelien louhintakustannus selvitys	Suomi	1982
28 Vähäaho, I.	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	Suomi	1982 *
29 Gulin, K.	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	Suomi	1982
30 Halkola, H.	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	Suomi	1982
31 Havukainen, J.	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	Suomi	1983
32 Havukainen, J.	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	Svenska	1983
33 Havukainen, J.	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	English	1983
34 Salmelainen, J.	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	Suomi	1983
35 Havukainen, J.	Matkakertomus kivihiilituhkan ympäristövaikutuskonferenssista	Suomi	1983
36 Hytti, P.	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	Suomi	1984
37 Leinonen, J.	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	Suomi	1984
38 Pirinen, J.	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	Suomi	1984 *
39 Latvala, A.	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	Suomi	1984
40 Korpela, J. & Schuller, M.	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennusselvitys (Jäli-selvitys)	Suomi	1984
41 Lahtinen, E.-R.	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	Suomi	1985
42 Korpi, J.	In Situ-kuormituskoee painumien määrittämiseksi	Suomi	1985
43 Havukainen, J.	Esirakentamisen kehittäminen	Suomi	1985
44 Vähäaho, I.	Jäähdytysmenetelmän käyttö	Suomi	1987
45 Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Latvala, A.	Kivihiilituhkan käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	Suomi	1987
46 Julkunen, A.	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	Suomi	1987
47 Hurri, K.-L.	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	Suomi	1988
48 Melander, K.	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	Suomi	1989
49 Leppänen, M.	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	Suomi	1989
50 Vähäaho, I. & Ryhänen, H.	Sulamiskondolidaation vaikutukset savessa	Suomi	1989
51 Vähäaho, I.	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	English	1989
52 Koskela, P.	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	Suomi	1989
53 Saari, M. & Korhonen, O.	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	Suomi	1990
54 Saari, M. & Volanen, N.	Ruoholahden koepaalutus	Suomi	1990
55 Yrjänä, J. & Korhonen, O.	Pystyjoitus Pikku-Huopalahdessa	Suomi	1991
56 Niinimäki, R. & Raudasmaa, P.	Viikinnmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	Suomi	1992

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET JATKUU

12,10,93

57 Nieminen, J. & Johansson, E. & Holopainen, P.	Viikinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	Suomi	1992
58 Ahola, J. & Virtanen, R.	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa	Suomi	1992
59 Ravea, T. & Korhonen, O.	Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset	Suomi	1992
60 Taipale, H. & Korhonen, O.	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	Suomi	1992
61 Karlstedt, P. & Halkola, H.	Ylijäämäsavien massastabilointi	Suomi	1993
62 Leiskallio, A. & Lehtonen, J.	Maankäytön geotekninen suunnittelu	Suomi	1993
63 Anttikoski, U. & Kumar, S. & Saarelainen, S.	Kalliokaivanto jätehuollossa Esiraportti	Suomi	1993

Hinnat: 1 kpl, 80 mk, 2-3 kpl 70 mk, 4-6 kpl 60 mk, 7- kpl 55 mk

*) painos loppuunmyyty