1898

VTT TIEDOTTEITA

PB99-118671

Paula Eskola & Ulla-Maija Mroueh

Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi

VTT Tiedotteita

VTT Tiedotteita

VTT Tiedotteita

VTT Tiedotteita

VTT Tiedotteita

REPRODUCED BY: NTIS
U.S. Department of Commerce
National Technical Information Service
Springfield, Virginia 22161

VTT VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS

ESPOO 1998

Julkaisija

VTT

Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
Puh. vaihde (09) 4561
Faksi (09) 456 4374

Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi
VTT Tiedotteita 1898 VTT–TIED–1898

Julkaisuaika
Toukokuu 1998

Projektinumero
K5SU00492

Tekijä(t)

Eskola, Paula & Mroueh, Ulla-Maija

Projektin nimi
Energiantuotannon ja teollisuuden sivutuotteiden hyötykäytön vaikutusten arviointi

Toimeksiantaja(t)
Lohja Rudus Oy Ab

Nimeke

Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi

Tiivistelmä

TEKESin Ympäristögeotekniikkaohjelmaan kuuluvan Rantatuhkaprojektin yhteydessä tehtiin Kivihiilivoimalan lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen maarakennuskäytön elinkaariarviointi, jossa tarkasteltavat hyötykäyttökohteet olivat tierakenne ja saven massastabilointi. Tutkimuksessa verrattiin lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käyttöä normaalin luonnon raaka-aineen (kalliomurske, sora ja hiekka) käyttöön hyötykäyttökohteessa. Käytettäessä luonnon raaka-aineita kohteessa lentotuhka ja rikinpoistotuote oletettiin sijoitettavaksi läjitykseen (kaatopaikalle). Stabilointikohteessa verrattiin täyteaineen ja sementin käyttöä ylijäämäsaven massastabiloinnissa. Lisäksi tarkasteltiin, mikä vaikutus ympäristökuormituksiin on sementin käytöllä lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen lisäaineena tien kantavan kerroksen alaosassa.

Tutkimuksessa selvitettiin materiaalien valmistuksen ja kuljetuksen sekä tien rakennuksen aiheuttamat ympäristökuormitukset, joita ovat: energian, polttoaineen ja raaka-aineiden kulutus, päästöt ilmaan ja maaperään, melu, pöly, maankäyttö sekä onnettomuusriskit. Tien elinkaaren aikaisista muista kuormituksista arvioitiin sivutuotteista maaperään liukenevia haitta-aineita 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Tien käytön aikaiset liikenteen päästöt jätettiin tarkastelun ulkopuolelle samoin kuin tien kunnossapidon vaikutukset. Lisäksi oletettiin, että tierakenne jää paikalleen tarkasteluajan jälkeen.

Tarkastellut tierakennevaihtoehdot olivat siis tierakenteen teko perinteisistä kiviaineksista ja sivutuotteiden läjitys tai sivutuotteiden sijoitus tierakenteeseen. Tutkimuksen mukaan suurin osa kuormituksista on jälkimmäisessä vaihtoehdossa pienempiä. Poikkeuksena olivat sivutuotteista liukenevista aineista johtuvat päästöt maaperään. Kiviainesvaihtoehdossa suuremmat päästöt ilmaan johtuivat lähinnä kiviainesten pitkistä kuljetusmatkoista.

Saven stabiloinnissa vaihtoehdot erosivat kuormituksiltaan hyvin paljon. Sementtistabiloinnin aiheuttamat ympäristökuormitukset olivat jopa kymmeniä kertoja täyteainestabilointia suuremmat. Sementtistabiloinnin aiheuttamat kuormitukset johtuivat pääosin sementin valmistuksen aiheuttamista kuormituksista. Myös sementin käyttö lisäaineena tien rakennekerroksissa lisää tierakenteen ympäristökuormituksia huomattavasti.

Tämä elinkaariarviointi tehtiin kuvaamaan tilannetta pääkaupunkiseudulla ja on siis aluekohtainen. Muualla, missä kiviaineksia olisi saatavilla lähempää, elinkaarianalyysin tulos voisi olla erilainen. Myös muilla valituilla rajauksilla on erittäin suuri vaikutus elinkaariarvioinnin tulokseen.

Toimintayksikkö
VTT Kemiantekniikka, Ympäristötekniikka, Betonimiehenkuja 5, PL 1403, 02044 VTT

ISSN ja avainnimeke
VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES 1235–0605 (nid.) 1455–0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)

ISBN
951–38–5288–1 (nid)
951–38–5289–X (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)

Kieli
suomi, engl. tiiv.

Luokitus (UDK)
625.7/.8:504.05

Avainsanat
earthwork, road construction, fly ash, combustion products, environmental effects

Myynti: VTT Tietopalvelu
PL 2000, 02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Sivuja
82 s. + liitt. 11 s.

Hintaryhmä
B

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES 1898

Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi

Paula Eskola & Ulla-Maija Mroueh
VTT Kemiantekniikka

VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS
ESPOO 1998

ISBN 951–38–5288–1 (nid.)
ISSN 1235–0605 (nid.)

ISBN 951–38–5289–X (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)
ISSN 1455–0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

NTIS is authorized to reproduce and sell this report. Permission for further reproduction must be obtained from the copyright owner.

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT),
Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN–02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Kemiantekniikka, Ympäristötekniikka, Betonimiehenkuja 5, PL 1403, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7022

VTT Kemiteknik, Miljöteknik, Betongblandargränden 5, PB 1403, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7022

VTT Chemical Technology, Environmental Technology,
Betonimiehenkuja 5, P.O.Box 1403, FIN–02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7022

Tekninen toimitus Maini Manninen

Oy EDITA Ab, ESPOO 1998

Eskola, Paula & Mroueh, Ulla-Maija. Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi. [Environmental impact of the use of fly ash and FGD residues in earthworks]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1898. 82 s. + liitt. 11 s.

UDK 625.7/.8:504.05
Avainsanat earthwork, road construction, fly ash, combustion products, environmental effects

TIIVISTELMÄ

TEKESin Ympäristögeotekniikkaohjelmaan kuuluvan Rantatuhkaprojektin yhteydessä tehtiin Kivihiilivoimalan lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen maarakennuskäytön elinkaariarviointi, jossa tarkasteltavat hyötykäyttökohteet olivat tierakenne ja saven massastabilointi. Tutkimuksessa verrattiin lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käyttöä normaalin luonnon raaka-aineen (kalliomurske, sora ja hiekka) käyttöön hyötykäyttökohteessa. Käytettäessä luonnon raaka-aineita kohteessa lentotuhka ja rikinpoistotuote oletettiin sijoitettavaksi läjitykseen (kaatopaikalle). Stabilointikohteessa verrattiin täyteaineen ja sementin käyttöä ylijäämäsaven massastabiloinnissa. Lisäksi tarkasteltiin, mikä vaikutus ympäristökuormituksiin on sementin käytöllä lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen lisäaineena tien kantavan kerroksen alaosassa.

Tutkimuksessa selvitettiin materiaalien valmistuksen ja kuljetuksen sekä tien rakennuksen aiheuttamat ympäristökuormitukset, joita ovat: energian, polttoaineen ja raaka-aineiden kulutus, päästöt ilmaan ja maaperään, melu, pöly, maankäyttö sekä onnettomuusriskit. Tien elinkaaren aikaisista muista kuormituksista arvioitiin sivutuotteista maaperään liukenevia haitta-aineita 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Tien käytön aikaiset liikenteen päästöt jätettiin tarkastelun ulkopuolelle samoin kuin tien kunnossapidon vaikutukset. Lisäksi oletettiin, että tierakenne jää paikalleen tarkasteluajan jälkeen.

Tarkastellut tierakennevaihtoehdot olivat siis tierakenteen teko perinteisistä kiviaineksista ja sivutuotteiden läjitys tai sivutuotteiden sijoitus tierakenteeseen. Tutkimuksen mukaan suurin osa kuormituksista on jälkimmäisessä vaihtoehdossa pienempiä. Poikkeuksena olivat sivutuotteista liukenevista aineista johtuvat päästöt maaperään. Kiviainesvaihtoehdossa suuremmat päästöt ilmaan johtuivat lähinnä kiviainesten pitkistä kuljetusmatkoista.

Saven stabiloinnissa vaihtoehdot erosivat kuormituksiltaan hyvin paljon. Sementtistabiloinnin aiheuttamat ympäristökuormitukset olivat jopa kymmeniä kertoja täyteainestabilointia suuremmat. Sementtistabiloinnin aiheuttamat kuormitukset johtuivat pääosin sementin valmistuksen aiheuttamista kuormituksista. Myös sementin käyttö lisäaineena tien rakennekerroksissa lisää tierakenteen ympäristökuormituksia huomattavasti.

Tämä elinkaariarviointi tehtiin kuvaamaan tilannetta pääkaupunkiseudulla ja on siis aluekohtainen. Muualla, missä kiviaineksia olisi saatavilla lähempää, elinkaarianalyysin tulos voisi olla erilainen. Myös muilla valituilla rajauksilla on erittäin suuri vaikutus elinkaariarvioinnin tulokseen.

Eskola, Paula & Mroueh, Ulla-Maija. Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi. [Environmental impact of the use of fly ash and FGD residues in earthworks]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1898. 82 p. + liitt. 11 p.

UDC 625.7/.8:504.05
Keywords earthwork, road construction, fly ash, combustion products, environmental effects

ABSTRACT

The goal of this project was to assess the environmental impact of using fly ash and flue gas desulphurization (FGD) residues (produced by pulverized coal-fired power plants which employ semi dry scrubbing technology) in earthworks. The use of fly ash and FGD residues was compared with the use of natural minerals (sand, gravel and macadam) in road construction and clay stabilization. When natural minerals were used, the fly ash and FGD residues were assumed to be disposed of in a landfill. The study was conducted according to the life cycle assessment (LCA) method recommended by SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry).

The assessment includes the following environmental effects caused by extraction, production and transportation of raw materials and the road construction process: energy and fuel consumption, consumption of raw materials, emissions into air, leaching of impurities, noise, dust emissions, land use and accident risks. The environmental impacts were assessed for a 1 km long road over a period of 50 years. The contribution from road traffic over the same period is not included in the study. The maintenance of the road was also excluded. It was assumed that the road would remain in place also after the studied period.

The compared options where:

1. a road built of fly ash and FGD residues
2. a road built of natural minerals, and disposal of fly ash and FGD residues in a landfill
3. stabilization of clay with fly ash and FGD residues
4. stabilization of clay with cement

On the basis of the study most of the environmental impacts of a road built of natural minerals (option 1) were higher than those of the road built of fly ash and FGD residue (option 2). Only the leached out impurities were higher in option 2. In the road built of natural minerals the higher emissions into air are mainly due to the transportation of sand and gravel over long distances.

In clay stabilization the environmental impacts of the two options differed significantly. The environmental impacts of cement stabilization were many times higher than those of the stabilization with fly ash and FGD residue. The difference was mainly due to the environmental impacts of cement production, which are very high.

This study describes the situation in the Helsinki metropolitan area and the results are therefore regional. Elsewhere, where sand and gravel are more readily available, the results of the study could be different. Also, other definitions made during the study may have had significant effects on the results.

ALKULAUSE

Rakentamisen sivutuotteena syntyville ylijäämämaille tarkoitettujen nykyisten täyttömäkien vastaanottokapasiteetti on rajallinen. Täyttömäkiin on sijoitettu myös kivihiilivoimalaitosten lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta. Niiden sijoittaminen täyttömäkiin on kuitenkin kansantaloudellisesti epäedullista ja vie tilaa ylijäämämaille tarkoitetuilta alueilta. Toisaalta tuhkatuotteilla on sitovia sementinkaltaisia ominaisuuksia, jotka mahdollistavat hyötykäytön myös rakenteissa, joissa on perinteisesti käytetty kiviaineksia. Tuhkatuotteiden hyötykäytön lisäämiseksi tarvitaan tietoa niiden ympäristövaikutuksista. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen maarakennuskäytön ympäristökuormitukset ja verrata niitä perinteisten materiaalien käytöstä ja sivutuotteiden läjittämisestä aiheutuviin ympäristökuormituksiin. Tutkimuksessa verrattiin myös lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksen ja sementin käyttöä ylijäämämaan (saven) stabiloinnissa. Tutkimuksessa tarkasteltiin rakenteiden koko elinkaarta.

Tutkimus tehtiin TEKESin Rakentamisen ympäristöteknologiaohjelman Ympäristögeotekniikkaohjelmaan kuuluvan Rantatuhkaprojektin yhteydessä. Rantatuhkaprojektia rahoittivat TEKESin lisäksi Lohja Rudus Oy Ab, Helsingin Energia, Helsingin kaupungin rakennusvirasto ja Helsingin Satama. Tutkimusta ohjaavaan ja valvovaan johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Tekn. lis. Martti Keppo, Lohja Rudus Oy Ab Ympäristöteknologia (pj.)
Toimistopäällikkö Kyösti Oasmaa, Helsingin Energia
Kehityspäällikkö Ari Kettunen, Helsingin kaupungin rakennusvirasto
Piiri-insinööri Erkki Konttinen, Helsingin kaupungin rakennusvirasto
Toimialajohtaja Mikko Leppänen, Viatek-Yhtiöt
Toimistopäällikkö Aarno Ahti, Helsingin Satama
Toimitusjohtaja Pekka Perttula, Vesihydro Oy
Ryhmäpäällikkö Esa Mäkelä, VTT Kemiantekniikka
Projekti-insinööri Pia Rämö, Lohja Rudus Oy Ab Ympäristöteknologia (siht.)

Projektiryhmään kuuluivat erikoistutkija Ulla-Maija Mroueh VTT Kemiantekniikasta ja tutkija Paula Eskola VTT Kemiantekniikasta.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ **3**

ABSTRACT **4**

ALKULAUSE **5**

SISÄLLYSLUETTELO **6**

1 TAUSTA **8**

2 MITÄ ON ELINKAARIANALYYSI **9**

3 ELINKAARIANALYYSIN TOTEUTUSTAVAT **9**

3.1 SETACIN SUOSITTELEMA MENETTELYTAPA 10

3.1.1 Tavoitteen määrittely *10*

3.1.2 Inventointi *11*

3.1.3 Vaikutusten arviointi *11*

3.1.4 Parannusmahdollisuuksien arviointi *12*

3.1.5 Toteutus kokonaisuutena *12*

3.2 ELINKAARIANALYYSIN AIKAISEMMAT SOVELLUKSET SIVUTUOTTEIDEN HYÖTYKÄYTÖN ARVIOINNISSA 13

3.2.1 Tilanne Suomessa ja muissa maissa *13*

3.2.2 Esimerkkejä erilaisista toteutustavoista *14*

4 TAVOITE JA RAJAUKSET **18**

4.1 TAVOITE 18

4.2 TARKASTELTAVAT KÄYTTÖKOHTEET 18

4.3 TARKASTELUN RAJAUKSET 21

4.3.1 Toiminnallinen yksikkö *21*

4.3.2 Tarkasteluaika *21*

4.3.3 Tarkastelun alueellinen laajuus *21*

4.3.4 Lentotuhka-rikinpoistotuoteseos *21*

4.3.5 Luonnon raaka-aineet *22*

4.3.6 Tierakenne *22*

4.3.7 Läjitys *24*

4.3.8 Stabilointi *24*

4.3.9 Käytetyt koneet ja laitteet *24*

4.3.10 Kuljetukset *25*

4.3.11 Tien käyttö *25*

4.4 TIEDON LAATU 25

5 TOIMINTAVAIHEET TUTKITTAVISSA VAIHTOEHDOISSA **27**

5.1 TUTKITTAVIEN VAIHTOEHTOJEN VIRTAUSKAAVIOT 27

5.1.1 Luonnon raaka-aineen käyttö tienrakennuksessa *28*

5.1.2 Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käyttö tienrakennuksessa tai stabiloinnissa *29*

5.1.3 Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sijoitus kaatopaikalle ... *30*
5.2 SIVUTUOTTEIDEN HYÖTYKÄYTTÖ ... 31
5.2.1 Varastointi, esikäsittely ja lastaus ... *31*
5.2.2 Kuljetukset ... *31*
5.2.3 Sivutuotteiden sijoitus kohteeseen ... *32*
5.2.4 Käytön aikaiset ympäristövaikutukset ... *33*
5.3 SIVUTUOTTEIDEN KAATOPAIKKASIJOITUS ... 33
5.3.1 Varastointi, lastaus ja kuljetukset ... *33*
5.3.2 Sivutuotteiden sijoitus läjitysalueelle ... *33*
5.3.3 Läjitysaluesijoituksen ympäristövaikutukset ... *34*
5.4 LUONNONMATERIAALIEN KÄYTTÖ ... 35
5.4.1 Kallion louhinta ... *35*
5.4.2 Hiekan ja soran otto ... *36*
5.4.3 Murskaus, seulonta ja pesu ... *36*
5.4.4 Varastointi, lastaus ja kuljetukset ... *37*
5.4.5 Tienrakennus ... *38*
5.4.6 Tien käytön aikaiset ympäristövaikutukset ... *38*
5.4.7 Saven stabilointi sementillä ... *39*

6 YMPÄRISTÖKUORMITUKSET JA -VAIKUTUKSET ... 39

6.1 RAAKA-AINEIDEN KULUTUS ... 40
6.2 ENERGIAN- JA POLTTOAINEEN KULUTUS ... 43
6.3 PÄÄSTÖT ILMAAN ... 45
6.3.1 Pakokaasupäästöt ... *45*
6.3.2 Pölypäästöt ... *50*
6.4 VAIKUTUKSET POHJAVETEEN ... 52
6.4.1 Lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta maaperään liukenevat aineet ... *52*
6.4.2 Veden laadun muutokset soranottoalueilla ... *55*
6.4.3 Pohjaveden likaantuminen ... *55*
6.5 MELU ... 56
6.6 MAAN KÄYTTÖ ... 59
6.7 MUUT YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET ... 60
6.7.1 Tienpintojen kuluminen ... *60*
6.7.2 Onnettomuusriskit ... *60*
6.7.3 Vaikutukset tien käyttöominaisuuksiin ja korjaustarpeeseen ... *61*

7 ELINKAAREN AIKAISTEN YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN ARVIOINTI ... 62

7.1 YMPÄRISTÖKUORMITUS- JA VAIKUTUSTIETOJEN SAATAVUUS JA LUOTETTAVUUSTASO ... 62
7.2 TULOSTEN EPÄVARMUUDET ... 64
7.3 TULOSTEN ARVIOINTI JA VERTAILU ... 68
7.4 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ ... 74

8 YHTEENVETO ... 75

LÄHDELUETTELO ... 79

LIITTEET

1 TAUSTA

Epävarmuus ympäristövaikutuksista ja riittävästä haitattomuudesta ympäristölle on ollut yksi energiantuotannon ja teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttöä rajoittavista tekijöistä. Haitattomuutta on pyritty varmistamaan arvioimalla epäpuhtauksien liukoisuutta materiaalista. Käytetyillä testimenetelmillä saadaan tuotettua arvio siitä, missä määrin tuotteen sisältämät epäpuhtaudet voivat liueta suotovesiin ja joutua siten tuotteen sijoitusympäristöön (Wahlström 1993, Wahlström *et al.* 1993).

Sivutuotteiden laajamittaisella hyötykäytöllä on kuitenkin myös muita positiivisia ja negatiivisia ympäristövaikutuksia. Vaihtoehtona olevaan kaatopaikkasijoitukseen ja luonnonraaka-aineiden käyttöön verrattuna voidaan saavuttaa tiettyjä etuja, kuten luonnonvarojen ja kaatopaikkatilan säästö sekä luonnonvarojen otosta aiheutuvien ympäristöhaittojen välttäminen. Toisaalta hyötykäyttösovelluksilla voi olla myös muita haittoja kuin epäpuhtauksien liukeneminen. Kaikkien vaikutusten ja niiden merkityksen tunteminen on tärkeää, jotta hyötykäytöstä ympäristölle aiheutuvat riskit pystytään tunnistamaan ja minimoimaan esim. oikealla käyttökohteen, teknisten menetelmien ja sijoituspaikan valinnalla. Haittojen ehkäiseminen ja hyötykäytön etujen tunteminen on myös tärkeä käytön esteitä poistava tekijä. Sivutuotteiden käytön ympäristöhyötyjen ja -haittojen kokonaisvaltaiseen tarkasteluun ei kuitenkaan toistaiseksi ole kiinnitetty paljoakaan huomiota.

Yleinen kiinnostus tuotteiden ja toimintojen ympäristövaikutusten kokonaisvaltaisten arviointimenetelmien kehittämiseen ja käyttöön on voimakkaasti lisääntynyt. Tällaisia menetelmiä ovat mm. elinkaarianalyysi, ympäristövaikutusten arviointi sekä ympäristöauditoinnit ja ympäristönhallintajärjestelmät. Elinkaaritarkastelumenetelmät mahdollistavat myös hyötykäytön ja sen vaihtoehtojen kokonaisvaikutusten vertailun. Koska elinkaarianalyysi on alun perin kehitetty kulutustuotetyyppisiin sovelluksiin tai tuotekehityksen tarpeisiin, sen lähtökohdat ja menettelytavat eivät välttämättä sellaisinaan sovellu muun tyyppisiin kohteisiin. Tarkastelutapaa on kuitenkin yhä laajemmin siirrytty soveltamaan erilaisiin prosesseihin ja menetelmiin ja samalla tarkastelunäkökulmaa pyritty laajentamaan (Häkkinen & Kronlöf 1994, Berge 1995, Liimatainen 1994, Schuurmans-Stehmann 1994, Broers *et al.* 1994).

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tehdä lentotuhkan ja märkä-kuivamenetelmän rikinpoistotuotteen maarakennuskäytön elinkaarianalyysi. Hyötykäyttökohteina ovat tierakenne ja saven stabilointi. Tutkimuksessa verrataan lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sijoittamista hyötykäyttökohteeseen normaalin luonnon raaka-aineen käyttöön vastaavassa kohteessa, jolloin lentotuhka ja rikinpoistotuote sijoitetaan läjitykseen. Stabilointikohteessa verrataan täyteaineen ja sementin käyttöä ylijäämäsaven pintastabiloinnissa. Lisäksi tutkitaan, miten sementin käyttö lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen lisäaineena tien kantavan kerroksen alaosassa vaikuttaa tuloksiin.

2 MITÄ ON ELINKAARIANALYYSI

Elinkaarianalyysilla (LCA, life cycle assessment/life cycle analysis) tarkoitetaan tuotteen, tuoteryhmän, materiaalin, prosessin tai toiminnon elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointia "kehdosta hautaan". Tarkoituksena on kaikkia elinkaaren vaiheita tarkastellen määrittää materiaali- ja päästövirrat ja tunnistaa tarkasteltavan järjestelmän tutkimuksen tavoitteen kannalta merkittävimmät haittavaikutukset ja niihin vaikuttavat tekijät. Tarkasteltavat päävaiheet ovat raaka-aineiden otto, tuotteen tai materiaalin valmistus, kuljetukset ja jakelu, käyttö ja kunnossapito, uudelleenkäyttö sekä jätteen käsittely ja sijoitus.

Tehdyn analyysin pohjalta on mahdollista vertailla tuote-, menetelmä- tai materiaalivaihtoehtoja. Tietoja voidaan käyttää yrityksen strategisten päätösten suunnittelussa, tuotteiden markkinoinnissa, tuotteiden ja menetelmien ympäristöoptimoinnissa sekä ensisijaisten kehitys- ja parannustarpeiden arviointiin. Elinkaarianalyysien tuottamaa tietoa on käytetty myös yhteiskunnan strategisten päätösten, lainsäädännön ja määräysten valmistelun pohjana. Ensimmäiset elinkaarianalyysit tehtiin jo 60-luvun lopulla, mutta menetelmän kehittäminen ja käyttö on laajentunut voimakkaasti vasta 1980-luvun lopussa ja 1990-luvulla.

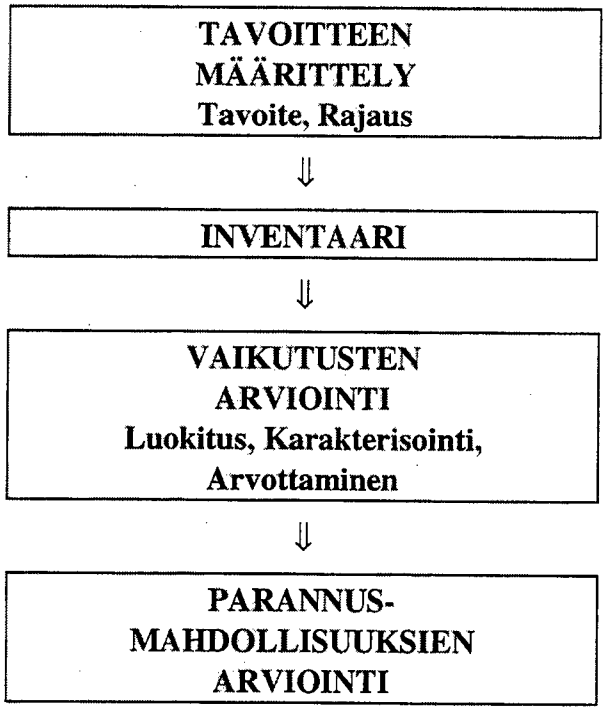
3 ELINKAARIANALYYSIN TOTEUTUSTAVAT

Elinkaarianalyysi ei ole sisällöltään ja laajuudeltaan tarkasti määritelty menetelmä. Menetelmien standardisoinnista ja harmonisoinnista on kuitenkin viime vuosina keskusteltu ja käynnissä on ollut useita kansainvälisiä terminologian, rakenteen ja menetelmien yhtenäistämiseen pyrkiviä hankkeita. Niiden tuloksena on tuotettu joitakin yleisiä menettelyohjeita. Tällainen on esimerkiksi SETACin (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) 'Code of practice'(1993). Menettelyohjeita ovat valmistelleet tai valmistelemassa myös EU, ISO (1994) sekä yksittäisistä maista mm. Kanada ja Ranska (CSA 1994, AFNOR 1993) ja Yhdysvalloissa EPA (Keoleian & Menerey 1993). Pohjoismaiden ministerineuvosto on käynnistänyt pohjoismaisen elinkaarityöryhmän, jonka tavoitteena on mm. kehittää pohjoismainen suoritusohjeisto (Nordic Code of Conduct on LCA) (Lindfors *et al.* 1995).

Yhtenä perusteena harmonisointitarpeelle on ollut eri yhteyksissä julkistettujen toisistaan poikkeavilla menetelmillä ja lähtöoletuksilla tehtyjen elinkaarianalyysien tulosten ristiriitaisuus. Ei kuitenkaan ole todennäköistä, että jatkossakaan käytettäisiin yhtä yleisesti hyväksyttyä, tarkoin rajattua menetelmää, koska elinkaarianalyysin luonteeseen kuuluu tehtävän toteutus käyttökohteen ja tavoitteen mukaan. Menetelmä ei edelleenkään ole kaikilta osiltaan "valmis", minkä vuoksi olisi jätettävä mahdollisuuksia jatkokehitykseen ja uusien vaihtoehtojen käyttöön.

3.1 SETACIN SUOSITTELEMA MENETTELYTAPA

Kansainvälisellä tasolla elinkaarianalyyseissä käytetään yleisimmin SETACin (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) suosittelemaa menettelytapaa ja perusrakennetta, vaikka sen joidenkin osien toteuttamisesta on vielä runsaasti eriäviä mielipiteitä ja erilaisia ehdotuksia. Elinkaarianalyysi jaetaan siinä neljään pääosaan (kuva 1). Ne ovat tavoitteen määrittely (Goal definition and scoping), tietojen keruu (Inventory), vaikutusten arviointi (Impact assessment) ja parannustoimenpiteiden arviointi (Improvement assessment).



Kuva 1. Elinkaarianalyysin päävaiheet (SETAC 1993).

3.1.1 Tavoitteen määrittely

Tavoitteen määrittelyvaiheessa määritellään tutkimuksen tarkoitus ja rajaus, toiminnallinen yksikkö eli yksikkö, jota kohden kerätyt tiedot ja vaikutusarviot lasketaan ja tutkimuksessa käytettävä laadunarviointimenetelmä. Vaihe vaikuttaa olennaisesti lopputulokseen, koska käytettävät menetelmät valitaan tavoitteen perusteella. Tavoitetta ja rajausta voidaan myös muuttaa tai tarkentaa tutkimuksen aikana, esimerkiksi jos havaitaan, että riittävästi tietoa ei ole saatavissa tai että jotkut kohdat ovat epäoleellisia tavoitteen kannalta. Tutkimusta käynnistettäessä olisi määriteltävä ainakin seuraavat seikat:

- Tarkoitus ja suunniteltu käyttökohde
- Tutkittavan järjestelmänjärjestelmien käyttötarkoitus ja toiminnallisen yksikön valinta
- Tutkittava tuoteryhmä, materiaali tms. ja valitut vaihtoehdot

- Järjestelmän rajat, myös tarkasteluaika ja tarkasteltavat vaikutukset
- Käytettävän tiedon laatu
- Tutkimuksen laaduntarkastusmenetelmä.

3.1.2 Inventointi

Inventoinnilla tarkoitetaan määritellyn systeemin materiaali- ja energiavirta-analyysiä, jossa kartoitetaan kaikki tarkasteltavaan järjestelmään tulevat ja siitä poistuvat materiaali- ja energiamäärät. Näitä ovat raaka-aineiden, energian ja veden käyttö, päästöt ilmaan ja vesiin sekä syntyvät jätemäärät ja jätteiden käsittelyn päästöt. Inventointivaiheen toteutuksesta on runsaasti kokemusta ja sen sisällöstä ja rakenteesta ollaan pääosiltaan suhteellisen yksimielisiä. Käytännön toteutuksissa joudutaan kuitenkin tekemään useita tarkasteltavaan tuotekokonaisuuteen, tuotantojärjestelmään ja käytettäviin tietolähteisiin liittyviä ratkaisuja, joista ei voida antaa kaikkiin tapauksiin soveltuvia yleisiä ohjeita.

Periaatteessa elinkaarianalyyseissa pyritään usein mahdollisimman täydelliseen tarkasteluun, jossa otetaan mukaan kaikki ympäristökuormitukset raaka-aineiden tuotannosta materiaalin hävitykseen. Käytännössä joudutaan kuitenkin tekemään aina rajauksia, jotta työmäärä pysyisi järkevällä tasolla. Tarkastelun alueellinen laajuus riippuu tutkimuksen tarkoituksesta. Siihen vaikuttaa keskeisesti analyysin tavoite. Jos tavoite on alueellisen järjestelmän tarkastelu, on järkevintä käyttää alueellista tietoa. Tekniikoiden yleisessä vertailussa taas laaja-alaisen tiedon käyttö tuottaa parhaan tuloksen. Viranomaisten ja kuluttajien käyttöön yleinen tarkastelu on yleensä paras, koska esimerkiksi viranomaispäätökset tehdään yleistasolla. Spesifisen yrityskohtaisen tiedon käyttö on perusteltua mm. silloin, kun yritys haluaa tehdä omien tuotteidensa elinkaarianalyysin.

Elinkaarianalyyseissä käytettävän perustiedon pitäisi olla mahdollisimman luotettavaa ja ajankohtaista, mutta käytännössä korkealaatuista, luotettavaa tietoa ei useinkaan ole saatavissa, vaan joudutaan käyttämään yksittäismittauksiin ja arvioihin perustuvia tietoja. Jotkut tiedot voivat myös jäädä kokonaan saamatta, koska mittaustietoa ei ole tai koska tiedot katsotaan liikesalaisuuksiksi jne. Puuttuvien ja epäluotettavien tietojen vaikutusta kokonaistulokseen voidaan pyrkiä arvioimaan herkkyysanalyysilla.

3.1.3 Vaikutusten arviointi

Vaikutusten arvioinnin tavoitteena on luokitella, karakterisoida ja arvottaa ympäristövaikutusten suuruus ja merkitys. Arvioinnissa käytetään erilaisia menetelmiä. Melko yleisesti käytetään tapaa, jossa ympäristökuormitukset jaetaan ryhmiin (potentiaalisten) ympäristövaikutusten, -ongelmien tai riskien perusteella. Sen jälkeen kuormitukset muutetaan käytettävissä olevan vaikutustiedon perusteella vaikutuksiksi ja painotetaan kunkin ryhmän sisällä vaikutuspotentiaalin mukaan.

Edellä esitetty menettely ei ole ainoa eikä välttämättä paras tapa arvioida elinkaarianalyysin tuloksia. Pelkkä tietojen esittäminen saattaa riittää joissakin tapauksissa. Joissakin menetelmissä taas tavoitteena on pidemmälle menevä vaikutusten

selvittäminen, jossa vaikutusverkkojen avulla seurataan toisen ja kolmannen asteen vaikutuksia. Arvioinnissa ja arvottamisessa on käytetty myös esimerkiksi asiantuntijoiden tai intressiryhmien mielipiteisiin perustuvaa arvotusta tai ympäristöhaittojen rahallista arviointia. Vaikutusten arvioinnilla ja arvottamisella pyritään helpottamaan saatujen tulosten vertailua ja arviointia, koska pelkkien materiaali- ja energiavirta-analyysissä saatujen lukuarvojen perusteella voi olla vaikea arvioida materiaalivirtojen todellista merkitystä tai tehtävillä parannuksilla saavutettavaa hyötyä. Kehittämällä mahdollisimman pitkälle tieteellisiin yleisesti hyväksyttävissä oleviin lähtökohtiin perustuvaa vaikutusten painotusta pystytään tulosten tulkinnalle antamaan yhtenäisemmät lähtökohdat kuin kunkin henkilökohtaisiin käsityksiin perustuvassa tulosten arvioinnissa.

Vaikutusten arvioinnista voidaan jatkaa aina jossain määrin subjektiivisiin näkemyksiin perustuvalla arvottamisella. Joidenkin näkemysten mukaan arvottaminen olisi aina jätettävä käyttäjän tehtäväksi. Analyysin tekijän pitkällekin menevä tulkinta voi kuitenkin olla hyödyllinen esimerkiksi tuotekehityskohteissa silloin, kun käyttäjä ei ehdi tai halua perehtyä ympäristövaikutustietoon. Arvottamisen pitäisi kuitenkin olla mahdollisimman läpinäkyvää ja tekijät ja oletukset, joihin päätökset ympäristöllisestä merkityksestä perustuvat, olisi aina perusteltava.

3.1.4 Parannusmahdollisuuksien arviointi

Parannusmahdollisuuksien arvioinnilla tarkoitetaan ehdotuksia niiksi toimenpiteiksi, joilla ympäristövaikutuksia voidaan vähentää. Parannusmahdollisuuksien arvioinnin kuulumisesta elinkaarianalyysiin ollaan jossain määrin eri mieltä. Parannusten saavuttaminen yleensä on analyysin perimmäinen tavoite ja jo tämän painottamiseksi jonkinlainen parannusmahdollisuuksien tarkastelu olisi hyvä liittää mukaan. Vaihetta varten ei vielä ole standardisoitavissa olevaa metodologiaa, vaikka arviointia on joissakin elinkaarianalyyseissa tehty.

3.1.5 Toteutus kokonaisuutena

Elinkaarianalyysi ei välttämättä ole eikä sen pitäisikään olla lineaarinen prosessi, jossa em. vaiheet seuraavat toisiaan. Iteratiivisessa lähestymistavassa tulosten merkittävyyttä arvioidaan prosessin aikana. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään yleinen tarkastelu, jonka perusteella pyritään aluksi tunnistamaan tärkeimmät ympäristöön vaikuttavat tekijät ja vaiheet. Herkkyys- ja epävarmuusanalyysia käyttäen tarkistetaan, miten paljon tulokset riippuvat tehdyistä rajoituksista ja valinnoista. Tämän perusteella tehdään tarvittavat muutokset järjestelmärajauksiin ja tunnistetaan kohteet, joiden tarkentamiseen keskitytään seuraavissa inventointi- ja arviointivaiheissa (Lindfors *et al.* 1995).

Elinkaarianalyysin kaikissa vaiheissa tehdään valintoja ja oletuksia, jotka vaikuttavat arvion tulokseen. Jotta elinkaarianalyysia voidaan pitää luotettavana, sen pitäisi olla "läpinäkyvä" eli lähtöoletukset ja -tiedot on esitettävä siten, että tiedot voidaan tarkastaa ja laskelmat toistaa. Läpinäkyvyys ja raportointi ovatkin menetelmän sisäänrakennetusta subjektiivisuudesta johtuen elinkaarianalyysin tärkeimpiä ja kriittisimpiä kohtia.

3.2 ELINKAARIANALYYSIN AIKAISEMMAT SOVELLUKSET SIVUTUOTTEIDEN HYÖTYKÄYTÖN ARVIOINNISSA

3.2.1 Tilanne Suomessa ja muissa maissa

Teollisuuden tai energiantuotannon sivutuotteiden käyttöön liittyviä julkistettuja elinkaarianalyyseja, joissa maarakennuksessa hyödynnettäviä jätemateriaaleja on vertailtu toisiinsa tai luonnon raaka-aineisiin, on toistaiseksi hyvin vähän (Schuurmans-Stehmann 1994, Broers *et al.* 1994, Dartsch 1993). Myöskään muissa tien- ja maarakennuskohteissa ei elinkaarianalyysiä ole vielä yleisesti hyödynnetty. Tarkasteluissa voidaan kuitenkin jossain määrin käyttää hyväksi talonrakennuksen ja rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arvioinnissa tehtyä perustyötä. Ruotsissa IVL on tehnyt tielaitokselle tienrakennuksen alustavan elinkaaritarkastelun (Stripple 1995). Suomessa on TEKESin rakentamisen ympäristöteknologiaohjelman yhteydessä tehty elinkaaritarkastelu, jossa on vertailtu sementti- ja asfalttipinnoitteita tierakenteissa (Häkkinen ja Mäkelä 1996). Lisäksi Suomessa on tehty tai tekeillä ainakin kaksi tierakenteen elinkaarikustannusanalyysiä. Toinen jo valmistunut arvio on tehty Oulun Yliopistossa (Kalliokoski 1995) ja toinen elinkaarikustannusanalyysi-projekti on parhaillaan käynnissä TPPT-projektin yhteydessä (Ruotoistenmäki *et al.* 1997).

Elinkaaritarkastelun tyyppisiä kokonaisvaikutusten arviointimenetelmiä voidaan kuitenkin hyödyntää myös sivutuotteiden hyötykäyttöä suunniteltaessa ja kehitettäessä. Kaikkien vaikutusten ja niiden merkityksen tunteminen on tärkeää, jotta hyötykäytöstä ympäristölle aiheutuvat riskit pystytään tunnistamaan ja minimoimaan esim. oikealla käyttökohteen, teknisten menetelmien ja sijoituspaikan valinnalla. Materiaalivalinta, joka on eräs elinkaariarvioinnin tärkeistä sovelluskohteista, on merkittävä kysymys maarakentamisessa, varsinkin kun käytettävät materiaalimäärät ovat erittäin suuria.

Hyötykäytön arviointimenetelmiä on syytä tarkastella myös osana rakennusmateriaaleille kehitettäviä yhtenäisiä ympäristövaikutusten arviointimenetelmiä. Rakennustuotteiden ekologisen vertailun menetelmiä kehitetään Suomessa mm. TEKESin Rakentamisen ympäristöteknologiaohjelman yhteydessä, jossa pääosin on keskitytty talonrakennuksessa käytettäviin materiaaleihin ja rakenneratkaisuihin. Muitakin rakennusaloja, kuten tienrakennuksessa käytettäviä materiaaleja, kuitenkin sivutaan projekteissa. Tavoitteena on myös kehittää tuoteryhmäkohtaisia rakennustuotteiden ympäristömerkin myöntämisperusteita.

Yleisissä menetelmissä ei vielä riittävän hyvin pystytä ottamaan huomioon sivutuotteiden hyötykäytön erityispiirteitä. Tällaisia ovat esimerkiksi luonnonraaka-aineiden oton sekä yleensä maan ja luonnonvarojen käytön vaikutusten ja merkityksen arviointi, jotka päästökeskeisissä tarkastelumenetelmissä ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Hyötykäytössä myös vaikutukset tuotteen kestoikään ja käytettävyyteen ovat oleellisia. Edelleen olisi otettava huomioon toimintaympäristön ominaisuudet ja sivutuotteiden sijoituksen merkitys erilaisissa toimintaympäristöissä (Broers *et al.* 1994). Esimerkiksi jo likaantunut kaupunkialue ja puhdas

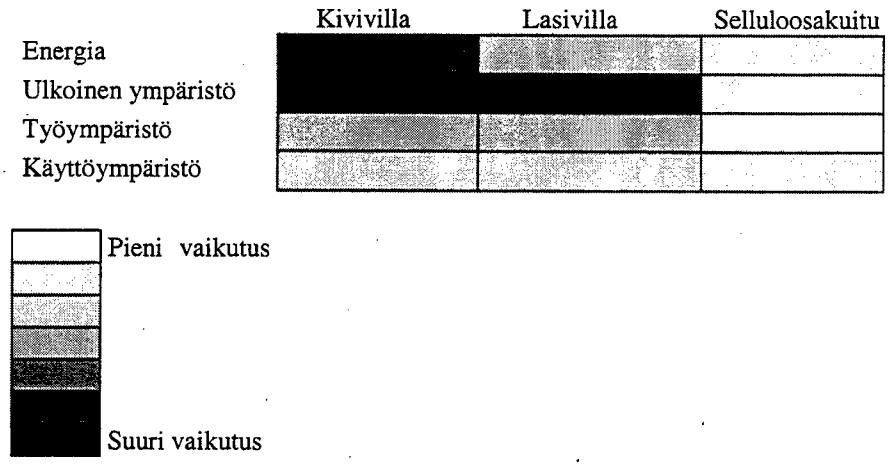
luonnonympäristö voivat sijoituskohteina olla herkkyydeltään huomattavasti toisistaan poikkeavia.

3.2.2 Esimerkkejä erilaisista toteutustavoista

Kuten edellä on jo todettu, elinkaarianalyysin sisältö ja toteutustapa määräytyy tavoitteiden perusteella. Tuotteen elinkaarianalyysissa voi tuotevaihtoehtojen vertailun lisäksi olla tavoitteena muiden tuotteen käyttöön ja käsittelyyn liittyvien tekijöiden arviointi, esimerkiksi parhaan mahdollisen jakelujärjestelmän, käyttötavan tai jätteen käsittelyjärjestelmän selvittäminen.

- **Laadullinen arviointi**

Kaikissa tapauksissa ei kaikkien osatekijöiden määrällinen selvittäminen ja vertailu ole tarpeen, vaan voidaan keskittyä yleisemmällä tasolla laadulliseen arviointiin. Esimerkki tällaisesta yleisestä vertailusta on kuvassa 2, jossa verrataan toisiinsa kolmea eristemateriaalia (Berge 1995). Tällöinkin on otettava huomioon elinkaaren kaikki vaiheet ja käytettävä mahdollisimman ajanmukaista lähtötietoutta. Tavoitteena on myös, että vertailu on helposti ajanmukaistettavissa kulloisenkin tietotason mukaiseksi. Menettely on käyttökelpoinen erityisesti silloin, kun materiaalien välillä on selvästi tunnistettavia eroja.



Kuva 2. Kolmen eristemateriaalin elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten karkea laadullinen vertailu (Berge 1995).

Edellä esitetyn tyyppistä tärkeimpien ympäristöparametrien pisteyttävää vertailua on viime aikoina käytetty useissa maissa rakennusmateriaalien arviointiin (Berge 1995, Tram *et al.* 1994, Steiger 1996). Edellä kuvattua vertailutapaa on käytetty myös Suomessa TPPT-ohjelman yhteydessä tehdyssä tierakentamisen ja –rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten peruskartoituksessa (Koski 1995). Vertai-

luissa käytetään yleensä perustana suhteellisen tarkkaa kuormitusten määrällistä selvittämistä, jolloin ei enää voida puhua pelkästä laadullisesta arvioinnista.

- **Rakennusmateriaalien ekologiset vertailumenetelmät**

Rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointi ja vertailu ekologisin perustein on kansainvälisellä tasolla ollut erittäin runsaasti esillä viime vuosien aikana. Rakennusmateriaalien ympäristöprofiilien arviointiin on esitetty menetelmiä ja kriteereitä esimerkiksi Yhdysvalloissa (AIA 1996) ja useissa Keski-Euroopan maissa (Steiger 1996). Yhtenä esimerkkinä tällaisesta materiaalien vertailumenetelmästä esitetään taulukossa 1 norjalaisen Bergen (1995) yhteispohjoismaisessa projektissa laatima ehdotus arviointikriteereistä. Taulukossa on esitetty muutamien materiaalien ekoprofiileja Bergen (1995) esittämien kriteerien mukaisesti arvioituna.

Berge (1995) on talonrakennusmateriaalien analyysissa valinnut pääkohdiksi teknisen kestävyyden, luonnonvarojen käytön, päästöt ja niiden vaikutukset sekä tulevan kehityksen. Tulevaa kehitystä ei esitetä vertailutaulukossa vaan erillisessä sanallisessa kuvauksessa, joka sisältää yhteenvedon myös muiden taulukon pääkohtien sisällöstä.

Tavanomaiseen elinkaarianalyysiin liittyvien tekijöiden lisäksi on siis otettu huomioon tekniset ominaisuudet, jotka vaikuttavat oleellisesti ympäristökuormitukseen. Materiaalin käyttöiän (kesto, korjaustarve) merkitys on talonrakennusmateriaaleilla tärkeä, koska ympäristökuormitus on paljon suurempi, jos materiaali joudutaan korvaamaan lyhyen ajan kuluttua. Kestävyys ja käyttökelpoisuus on yksityiskohtaisen tiedon puuttuessa arvioitu sanallisella asteikolla. Berge (1995) on käyttänyt määritelmiä erittäin hyvä, hyvä, korkea, keskitasoinen ja matala. Käyttöikään vaikuttavat kestävyyden ohella myös monet muut seikat, joista maanrakennusmateriaaleilla oleellisia ovat mm. yhdyskuntien kehitys ja maankäytön muutokset.

Tarvittava raaka-ainemäärä näkyy ympäristöarvioissa myös kohdassa luonnonvarojen käyttö, jonka painoarvo useissa elinkaariarvioissa on jäänyt pieneksi päästöihin verrattuna. Materiaalin käyttö esitetään ainoastaan yhtenä kohtana verrattuna päästökohtiin, joita on useita. Jos kohtia ei painoteta eri lailla, raaka-aineiden käytön painoarvo jää pieneksi.

Taulukko 1. Esimerkki talonrakennuksessa käytettävien materiaalien ekologisen vertailun kriteereistä (Berge 1995).

Ominaisuusryhmä	Ominaisuus	Sei-nätiili	Luonnon-kivi	Betoni ra-kenteissa	Betoni, kate
Tekniset ominaisuudet	Paino, kg/m^3	1 800	2 700	2 400	2 200
	Kestävyys	Hyvä	Hyvä	Erittäin hyvä	Keskitasoa
	Materiaalihukka; %	10		16	4
Raaka-aine-ominaisuudet	Arvioidut jäljellä olevat raaka-ainereservit, vuotta	-	-	-	-
	Raaka-ainetyyppi* F = uusiutuva	15	16	11	11
	Primäärienergiankulutus, Pohjoismaissa, MJ/kg	2		0,6	
	Primäärienergian kulutus, Keski-Euroopassa, MJ/kg	3	0,1	1	
	Polttoarvo, MJ/kg	-	-	-	-
	Veden kulutus, l/kg	520	10	170	
Ympäristömyrkyllisyys ja vaikutus otsoniker-rokseen	Työympäristö*	48	48 -(37)	48-36	48-36
	Sisäilma*	-	46	-	-
	Ulkoinen ympäristö* (jätettä lukuunottamatta)	21-49	-	48-36-51	48-36-51
	Purkujätteen vaikutukset ulkoiseen ympäristöön*	-	-	-	-
Ilman epäpuhtaudet (Skandinavia)	Kasvihuonevaikutus, g/kg	160		120	
	Happamoittava vaikutus, g/kg	2		0,5	
	Kemiall. hapenkulutus ja otsoninmuodostuspotentiaali g/kg	3		0,4	
Ilman epäpuhtaudet (Keski-Eurooppa)	Kasvihuonevaikutus, g/kg	190	8	65	131
	Happamoittava vaikutus, g/kg	2	0	1	1
	Kemiall. hapenkulutus ja otsoninmuodostuspotentiaali g/kg	17	0	0,3	1
Tuotantojäte	Määrä g/kg tuotetta	87		32	
	Ongelmajäteosuus	15		-	
Rakennus- ja purkujäte	Jäteluokka	c	c	c	c

*Raaka-ainetyyppi ja ympäristömyrkyllisyys on esitetty numerokoodilla, joka viittaa kyseiset ominaisuudet sisältävään selitystaulukkoon. Ympäristömyrkyllisyyskoodin selityksenä esitetään ympäristömyrkkytyyppi ja sen pääasialliset haitat (Esimerkiksi: 48 - Erilaiset pölyt, aiheuttavat hengitystieärsytystä ja vaikuttavat alailmakehän fotokemiallisten oksidanttien muodostukseen).
Kasvihuonevaikutus esitetään CO_2-ekvivalentteina.
Happamoittava vaikutus esitetään SO_2-ekvivalentteina.
Kemiallinen hapenkulutus ja otsoninmuodostuspotentiaali esitetään grammoina NO_x .
Purkujäteluokka kuvaa jätteen sijoitettavuutta:
a - poltto ilman kaasunpuhdistusta
b - poltto kaasunpuhdistuksella varustettuna
c - käyttö täytemateriaalina
d - sijoitus hyväksytylle kaatopaikalle
e - sijoitus erityiskaatopaikalle.

- **Lannoiteteollisuuden kipsijätteen tienrakennuskäytön elinkaaritarkastelu**

Leidenin yliopistossa on käytetty yliopiston kehittämää, yhtenä versiona yleisesti kaupallisessakin käytössä olevaa elinkaariarviointimenetelmää myös tienrakennusmateriaalien ja materiaalien hyötykäytön tarkasteluun (Broers *et al.* 1994). Lannoiteteollisuuden kipsijätteen käyttöä tienpengerryksissä arvioitiin ensimmäisenä tähän alueeseen liittyvänä sovelluksena. Vertailuvaihtoehtoina olivat:

-Pengerryksen rakentaminen kipsijätteestä

-Pengerryksen rakentaminen luonnonhiekasta ja kipsijätteen dumppaus vesistöön

-Pengerryksen rakentaminen luonnonhiekasta ja kipsijätteen sijoitus maankaatopaikalle.

Toiminnallisena yksikkönä käytettiin kilometrin pituista tienpengerrystä, jonka käyttöikä on 60 vuotta ja johon sijoitetaan 78 kilotonnia kipsijätettä.

Tarkasteltavien ympäristövaikutusten luettelosta jouduttiin poistamaan joitakin vaikutusryhmiä tiedon tai soveltuvan tarkastelumenetelmän puutteen takia. Tällaisia olivat uusiutumattomien raaka-aineiden käyttö, melu, säteily sekä vaikutukset ekosysteemiin ja maisemaan. Saadut tulokset esitettiin vaikutusarviona. Kaatopaikkasijoitus arvioitiin jokseenkin selvästi huonoimmaksi vaihtoehdoksi, kun taas vesistöön päästämisen ja hyötykäytön vertailu on jo arvotuskysymys. Ekotoksisuuteen vaikuttavista tekijöistä fossiilisen energian käyttö arvioitiin selvästi merkittävämmäksi kuin epäpuhtauksien liukoisuus hyötykäytettävästä tuotteesta.

Tekijän mukaan arvioinnissa ilmenneitä ongelmia olivat mm.

-ympäristökuormitustietojen ja teknistä toimivuutta koskevien tietojen epävarmuus, josta syystä herkkyysanalyysi on erittäin tärkeä.

-massaraaka-aineiden käytön arviointimenetelmän puute, jonka vuoksi vaikutus luonnonvarojen käyttöön jäi arvioimatta

-käytetty menetelmä ei ota huomioon paikallisia tekijöitä, jotka tienrakennuksessa ovat erittäin merkittäviä.

Edellä mainittuihin ongelmiin on kiinnitetty huomiota myös muiden rakennustuotteiden elinkaaritarkasteluissa ja niihin on joiltakin osin pyritty kehittämään ratkaisuja.

4 TAVOITE JA RAJAUKSET

4.1 TAVOITE

Tutkimuksen tavoitteena on arvioida lentotuhkan ja puolikuivan rikinpoistotuotteen seoksen maarakennuskäytön elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset ja verrata niitä sivutuotteiden käytön vaihtoehtona olevan luonnonraaka-aineiden käytön vaikutuksiin. Lisäksi oletetaan, että luononraaka-aineita käytettäessä sivutuotteet sijoitetaan läjitysalueelle, mikä on maarakennuskäytön todennäköisin vaihtoehto.

4.2 TARKASTELTAVAT KÄYTTÖKOHTEET

Tarkastelun lähtökohtana oli pääkaupunkiseudulla syntyvien energiantuotannon sivutuotteiden sijoittaminen maarakennuskohteisiin. Raaka-aineiden saatavuus ja kuljetusmatkat on siksi arvioitu pääkaupunkiseudun olosuhteiden perusteella.

Tarkasteltaviksi käyttökohteiksi pyrittiin valitsemaan tähänastisten kokemusten perusteella parhaiten energiantuotannon sivutuotteille soveltuvat kohteet. Valinnassa otettiin huomioon tekniset ja ympäristötekijät. Ympäristön kannalta parhaita rakennuskohteita ovat teollisuusalueet ja muut vastaavat alueet, joilla epäpuhtauksia joutuu ympäristöön myös muista toiminnoista. Pohjavesialueille rakentaminen ei ole koskaan suositeltavaa. Sekä ympäristö- että kustannussyistä materiaalia olisi pyrittävä sijoittamaan mahdollisimman paljon samalle alueelle. Epäpuhtauksien liukenemisen rajoittamiseksi rakenne olisi peitettävä vettä eristävällä materiaalilla, jollaisena tavallisimmin käytetään asfalttia. Teknisesti lentotuhka-rikinpoistotuoteseokset soveltuvat kohteisiin, joissa vaaditaan suhteellisen suurta kantavuutta.

Ensimmäiseksi tarkasteltavaksi hyötykäyttökohteeksi valittiin tie, jossa jakava kerros ja kantavan kerroksen alaosa rakennetaan lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksesta (LT/RPT-seos). Vertailukohteena oli normaaleista kiviaineksista rakennettu tie ja LT/RPT-seoksen läjitys eli sijoitus maantäyttöalueelle. Lisäksi yhtenä vertailukohteena tarkasteltiin Herttoniemeen rakennettua koetietä, johon oli sijoitettu lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta. Tämä ei ollut kuitenkaan suoraan verrannollinen muihin tierakenteisiin, koska tien jakava kerros oli huomattavasti paksumpi kuin muissa tierakenteissa ja siihen oli sijoitettu suhteessa suurempi määrä LT/RPT-seosta. Herttoniemen koetietä verrattiin toiseen normaaleista kiviaineksista rakennettuun tiehen, jonka paksuus oli sama.

Toinen tarkasteltava hyötykäyttökohde oli täyteaineen (LT/RPT-seos) käyttö saven massastabiloinnissa puistoalueen tai kävelytien pohjarakenteissa. Tätä verrattiin saven stabilointiin sementillä.

Sijoitusvaihtoehdot olivat seuraavat:

1. Tuhkatie (tyypillinen lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävä tie) + läjitys

Asfaltoitu teollisuusalueelle merenrannalle rakennettava tie, jonka rakenne on seuraava:

Tie A

päällyste:	asfaltti	5 cm
kantava kerros:	murske (0 - 32 mm)	15 cm
	90/10-seos (LT/RPT)	15 cm
jakava kerros:	70/30-seos (LT/RPT)	15 cm
pengertäyte:	70/30-seos (LT/RPT)	60 cm
eristyskerros:	hiekka (0 - 50 mm)	25 cm

Tie B

päällyste:	asfaltti	5 cm
kantava kerros:	murske (0 - 32 mm)	15 cm
	90/10-seos (LT/RPT)	15 cm
jakava kerros:	90/10-seos (LT/RPT)	15 cm
pengertäyte:	90/10-seos (LT/RPT)	60 cm
eristyskerros:	hiekka (0 - 50 mm)	25 cm

Tie C

päällyste:	asfaltti	5 cm
kantava kerros:	murske (0 - 32 mm)	15 cm
	90/10-seos (LT/RPT)	15 cm
	+5 % sementtiä	
jakava kerros:	90/10-seos (LT/RPT)	15 cm
pengertäyte:	90/10-seos (LT/RPT)	60 cm
eristyskerros:	hiekka (0 - 50 mm)	25 cm

2. Kivitie 1 (vertailurakenne, jossa on käytetty normaalia kiviainesta, katuluokka 5)

Asfaltoitu teollisuusalueelle merenrannalle rakennettava tie, jonka rakenne on seuraava (vertailurakenteessa käytettiin sekä soraa että mursketta, jotta molempien kiviainestyyppien aiheuttamat kuormitukset tulisivat otetuksi huomioon):

päällyste:	asfaltti	5 cm
kantava kerros:	murske (0 - 32 mm)	15 cm
jakava kerros:	sora (0 - 100 mm)	30 cm
suodatinkerros:	hiekka (0 - 50 mm)	25 cm
pengertäyte:	louhe (0 - 600 mm)	60 cm

3. Herttoniemen koetie + läjitys

Vuoden 1996 alussa rakennettiin kaksi 60 m pitkää ja 6 m leveää kävelytieosuutta Sorsavuorenraitilla (paaluvälit 270 - 330 ja 330 - 390). Teiden rakenne oli seuraava:

päällyste:	asfaltti	5 cm
kantava kerros:	murske (0 - 32 mm)	15 cm
	90/10-seos (LT/RPT)	30 cm
jakava kerros:	70/30-seos (LT/RPT)	415 cm (keskimääräinen paksuus)
pengertäyte:	louhe (0 - 600 mm)	43 cm (keskimääräinen paksuus, täyttö tasoon +1,7 m)

Toisella tieosuudella käytettiin lisäksi kantavassa kerroksessa 90/10-seoksen seassa 5 % sementtiä.

4. Kivitie 2 (Herttoniemen koetien vertailurakenne, jossa on käytetty normaalia kiviainesta)

Asfaltoitu teollisuusalueelle merenrannalle rakennettava tie, jonka rakenne on seuraava:

päällyste:	asfaltti	5 cm
kantava kerros:	murske (0 - 32 mm)	15 cm
jakava kerros:	sora (0 - 100 mm)	30 cm
penger:	louhe (0 - 600 mm)	453 cm

5. Täyteainestabilointi

Ylijäämäsavea stabiloidaan täyteaineella (LT/RPT-seos) rakennettaessa esimerkiksi puistoalueen pohjaa. Stabilointi tehdään massastabilointina. Oletetaan, että täyteainetta käytetään sama määrä kuin LT/RPT-seosta tuhkatierakenteissa A, B ja C. Täyteainetta tarvitaan 50 % saven massasta (savea 22 360 t ja täyteainetta 11 180 t). Stabiloidun savikerroksen paksuus on 1 m.

6. Sementtistabilointi

Ylijäämäsavea stabiloidaan sementillä pintastabilointina. Oletetaan, että stabiloitavaa savea on sama määrä kuin täyteainestabiloinnissa, eli 22 360 t (17 070 m^3). Sementtiä lisätään 7 % saven kuivapainosta (745 t). Pintastabiloinnissa stabilointi tehdään 0,2 m paksuisina kerroksina. Stabiloitavan savikerroksen kokonaispaksuus on 1 m.

4.3 TARKASTELUN RAJAUKSET

4.3.1 Toiminnallinen yksikkö

Toiminnalliseksi yksiköksi valittiin eri tierakenteiden tarkastelussa yhden kilometrin pituinen 10 metriä leveä tie. Herttoniemen koetien ja sen vertailutien toiminnallinen yksikkö oli 338 m pitkä ja 6 m leveä tieosuus. Tämä tien pituus valittiin siten, että sijoitettu sivutuotemäärä oli sama kuin muissa tievaihtoehdoissa.

Läjitykseen ja täyteainestabilointiin oletettiin myös sijoitettavan sama sivutuotemäärä kuin tierakenteeseen. Stabilointikohteissa toiminnallinen yksikkö oli stabiloitavan saven määrä (22 360 tonnia), joka määräytyi sijoitettavan täyteainemäärän mukaan.

4.3.2 Tarkasteluaika

Tarkasteluajaksi valittiin 50 vuotta, mikä voidaan olettaa normaaliksi käyttöajaksi tierakenteelle. Tien pintakerroksen käyttöaika on lyhyempi ja sitä joudutaan korjaamaan useaan kertaan tarkastelujakson aikana. Tässä tutkimuksessa käyttöaika valittiin itse tierakenteen oletetun käyttöajan mukaan. Tarkasteluaika on sama kaikissa vaihtoehdoissa. Rakenne voi jäädä paikoilleen tämän tarkastelujakson jälkeenkin tai se voidaan uudelleensijoittaa (esim. kierrätykseen tai kaatopaikalle). Tässä tutkimuksessa toiminta tarkasteluajan jälkeen rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle.

4.3.3 Tarkastelun alueellinen laajuus

Tarkastelun lähtökohtana on ollut, että kivihiilivoimalan sivutuotteet syntyvät ja ne sijoitetaan hyötykäyttöön tai läjitykseen pääkaupunkiseudulla. Tarkastelussa on käytetty paikallisia tietoja, niin paljon kuin niitä on ollut saatavissa. Näitä tietoja on täydennetty kirjallisuustiedoin käyttäen ensisijaisesti suomalaista tietoa. Kansainvälistä kirjallisuutta käytettiin, jos muuta ei ollut saatavissa. Työkoneiden käyttöaikojen, energian- ja polttoaineen kulutusten ja päästöjen laskeminen on esitetty erillisessä raportissa (Eskola 1997). Raportista löytyvät myös kaikki laskennassa käytetyt tietolähteet.

4.3.4 Lentotuhka-rikinpoistotuoteseos

Lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen elinkaari rajattiin alkavaksi tuotantolaitoksen siilosta. Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen erotusprosessit ja siirto siiloon jätettiin siis tarkastelun ulkopuolelle. Lähtökohtana tässä tutkimuksessa oli se, että lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen tuotantovaiheessa eli energiantuotantoprosessissa syntyviä kuormituksia ei lasketa mukaan tarkasteluun, koska tuhkaa syntyy riippumatta siitä, onko sille käyttökohde vai ei. Energiantuotantoprosessin mukaan ottaminen vaikuttaisi määrällisiin tuloksiin, mutta ei vertailuvaihtoehtojen järjestykseen, koska samat kuormitukset olisivat mukana sekä läjitys- että maanraken-

nuskäyttövaihtoehdossa. Energiantuotantoprosessin kuormitukset olisi tällöin jaettava päätuotteiden (sähkö ja lämpö) ja sivutuotteiden kesken.

Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käsittelyyn käytettyjen laitteiden päästöt laskettiin laitoksen päästötietojen perusteella laitteiden energiankulutuksen suhteessa. Päästötietoina käytettiin Helsingin Energian päästötietoja vuodelta 1995.

Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen koostumus vaihtelee jonkin verran käytetyn hiilen laadun vaihtelun takia. Tätä vaihtelua ei kuitenkaan pystytty ottamaan huomioon tässä tutkimuksessa. Eri aineiden liukeneminen maaperään arvioitiin Hjelmarin *et al.* (1991) kolonnitestien perusteella, joissa oli tutkittu amerikkalaista hiiltä (rikkipitoisuus noin 1,3 %). Helsingin Energia käyttää puolalaista hiiltä, jonka rikkipitoisuus on noin 0,7 % (Karlstedt ja Halkola 1993, Ranta *et al.* 1987). Siksi voidaan olettaa, että Hjelmarin *et al.* (1991) kokeiden avulla lasketut sulfaatin liukoisuudet ovat jonkin verran todellista suurempia.

4.3.5 Luonnon raaka-aineet

Luonnon kiviainesten elinkaari oletettiin alkavaksi kiviaineksen (soran tai hiekan) otosta. Louheen ja murskeen elinkaari oletettiin alkavaksi kalliosta, josta ne louhitaan. Lisäaineina käytettiin sementtiä ja vettä. Sementistä otettiin huomioon koko elinkaari, johon sisältyi sementin raaka-aineiden otto ja kuljetus, sementin valmistukseen tarvittavan energian tuotanto sekä sementin valmistus ja kuljetus. Vedestä otettiin huomioon vain sen kulutus. Veden oton, puhdistuksen, käsittelyn jne. kuormitukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska ne oletettiin tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömän pieniksi.

4.3.6 Tierakenne

Tierakenteissa valittiin kerrospaksuudet ja kiviainesten raekoot olettaen, että tie on teollisuusalueelle rakennettava tie, joka luokitellaan katuluokkaan 5. Taulukossa 2 on esitetty eri tierakenteissa olevien rakennekerrosten tilavuudet, massat ja tilavuuspainot varastoinnin ja kuljetusten aikana sekä tiivistettynä. Maa- ja kalliomassojen tilavuudet eri työvaiheissa laskettiin käyttäen massakertoimia (TS-tietokortit: 5009, 5010, 5011, 5012, 5014, 5015 ja 5016). Lentotuhkaseosten tilavuudet eri työvaiheissa laskettiin tilavuuspainojen suhteista.

Taulukko 2. Eri tierakenteissa olevien rakennekerrosten tilavuudet, massat ja tilavuuspainot eri työvaiheissa.

Tuhkatie A 1 km (10 m leveä)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Teor. rakenne tilavuus (lopull.rakenne)	Tod.irto-tilavuus (kuljetus)	Tod. kiinto-tilavuus (varasto)	Tod.kiinto-tilavuus (kallio)	Til.paino kulj. aikana	Maksimi-kuivatil. paino	Massa kulj. aikana	Til. paino tiivistet-tynä	Massa tiivistettynä 92 %
		m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	kg/m3	t	kg/m3 rtr	t
päällyste	AB 20	0,05	500							2500	1250
kk	murske(0-32)	0,15	1500	2210	1230	1180		2200	4860		5280
kk	90/10	0,15	1500	1920	2330		1000	1390	1920	1400	2100
jk	70/30	0,15	1500	1850	2330		1000	1350	1850	1400	2100
pt	70/30	0,6	6000	7410	9300		1000	1350	7410	1400	8400
ek	hiekka(0-50)	0,25	2500	3850	3130			2000	7700		8370
Tuhkatie B 1 km (10 m leveä)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Teor. rakenne tilavuus (lopull.rakenne)	Tod.irto-tilavuus (kuljetus)	Tod. kiinto-tilavuus (varasto)	Tod.kiinto-tilavuus (kallio)	Til.paino kulj. aikana	Maksimi-kuivatil. paino	Massa kulj. aikana	Til. paino tiivistet-tynä	Massa tiivistettynä 92 %
		m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	kg/m3	t	kg/m3 rtr	t
päällyste	AB 20	0,05	500							2500	1250
kk	murske(0-32)	0,15	1500	2210	1230	1180		2200	4860		5280
kk	90/10	0,15	1500	1920	2330		1000	1390	1920	1400	2100
jk	90/10	0,15	1500	1920	2330		1000	1390	1920	1400	2100
pt	90/10	0,6	6000	7690	9300		1000	1390	7690	1400	8400
ek	hiekka(0-50)	0,25	2500	3850	3130			2000	7700		8370
Tuhkatie C 1 km (10 m leveä)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Teor. rakenne tilavuus (lopull.rakenne)	Tod.irto-tilavuus (kuljetus)	Tod. kiinto-tilavuus (varasto)	Tod.kiinto-tilavuus (kallio)	Til.paino kulj. aikana	Maksimi-kuivatil. paino	Massa kulj. aikana	Til. paino tiivistet-tynä	Massa tiivistettynä 92 %
		m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	kg/m3	t	kg/m3 rtr	t
päällyste	AB 20	0,05	500							2500	1250
kk	murske(0-32)	0,15	1500	2210	1230	1180		2200	4860		5280
kk	90/10 + sem.	0,15	1500	1920	2330		1000	1400	1920	1400	2100
jk	90/10	0,15	1500	1920	2330		1000	1390	1920	1400	2100
pt	90/10	0,6	6000	7690	9300		1000	1390	7690	1400	8400
ek	hiekka(0-50)	0,25	2500	3850	3130			2000	7700		8370
Kivitie1 (vertailutie) 1 km (10 m leveä)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Teor. rakenne tilavuus (lopull.rakenne)	Tod.irto-tilavuus (kuljetus)	Tod. kiinto-tilavuus (varasto)	Tod.kiinto-tilavuus (kallio)	Til.paino kulj. aikana	Maksimi-kuivatil. paino	Massa kulj. aikana	Til. paino tiivistet-tynä	Massa tiivistettynä 92 %
		m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	kg/m3	t	kg/m3 rtr	t
päällyste	AB 20	0,05	500							2500	1250
kk	murske(0-32)	0,15	1500	2210	1230	1180		2200	4860		5280
jk	sora(0-100)	0,3	3000	4620	4000			2000	9240		10040
sk	hiekka(0-50)	0,25	2500	3850	3130			2000	7700		8370
pt	tasoitussora	0,05	500	1540	1340			2000	3080		3350
pt	louhe (0-600)	0,55	5500	5560	3180	3020		1800	10010		10880
Hertton. koetiet 338 m (6 m leveä)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Teor. rakenne tilavuus (lopull.rakenne)	Tod.irto-tilavuus (kuljetus)	Tod. kiinto-tilavuus (varasto)	Tod.kiinto-tilavuus (kallio)	Til.paino kulj. aikana	Maksimi-kuivatil. paino	Massa kulj. aikana	Til. paino tiivistet-tynä	Massa tiivistettynä 92 %
		m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	kg/m3	t	kg/m3 rtr	t
päällyste	AB 20	0,05	102							2500	254
kk	murske(0-32)	0,15	305	450	250	240		2200	990		1080
kk/jk	90/10 (+sem.)	0,3	609	780	940		1000	1400	780	1500	914
jk	70/30	4,15	8420	10400	13050		1000	1350	10400	1500	12630
pt	tasoitussora	0,05	102	320	280			2000	640		700
pt	louhe (0-600)	0,38	771	780	446	424		1800	1400		1520
Kivitie2 (vertailutie) 338 m (6 m leveä)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Teor. rakenne tilavuus (lopull.rakenne)	Tod.irto-tilavuus (kuljetus)	Tod. kiinto-tilavuus (varasto)	Tod.kiinto-tilavuus (kallio)	Til.paino kulj. aikana	Maksimi-kuivatil. paino	Massa kulj. aikana	Til. paino tiivistet-tynä	Massa tiivistettynä 92 %
		m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	kg/m3	t	kg/m3 rtr	t
päällyste	AB 20	0,05	101							2500	254
kk	murske(0-32)	0,15	304	450	250	240		2200	990		1080
jk	sora(0-100)	0,3	608	940	810			2000	1880		2040
pt	tasoitussora	0,05	102	320	280			2000	640		700
pt	louhe (0-600)	4,53	9190	9280	5310	5050		1800	16700		18150

Kaikki tiet oletettiin päällystettäväksi asfaltilla (AB 20). Asfaltointia ei ole kuitenkaan otettu huomioon laskuissa, koska asfaltoinnin aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat samat eri vaihtoehdoissa.

4.3.7 Läjitys

Oletettiin, että lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sijoittaminen läjitysalueelle tapahtuu nk. viipalemenetelmällä, jossa jäte sijoitetaan louheesta rakennettuihin allasrakenteisiin. Allasrakenteiden koko valittiin samaksi kuin Vantaan Pitkäsuon täyttömäellä. Tarkemmat tiedot löytyvät kohdasta 5.3.2.

4.3.8 Stabilointi

Ylijäämäsaven stabilointi oletettiin tehtäväksi massastabilointina. Stabiloitavan saven määrä oli 22 360 t. Täyteainestabiloinnissa täyteainetta lisättiin 50 % saven määrästä eli 11 180 t. Sementtistabiloinnissa sementtiä lisättiin 7 % saven kuiva-ainemäärästä eli 745 t.

4.3.9 Käytetyt koneet ja laitteet

Työkoneiden käyttöaikojen laskemisessa jouduttiin tekemään monia oletuksia, koska kaikki työvaiheet voidaan suorittaa monella tavalla ja useilla erilaisilla ja eri tehoisilla työkoneilla. Laskuissa käytettiin teholtaan keskitasoisia koneita, joiden työvuorokapasiteetit olivat saatavilla (TS-tietokortit). Koneiden käyttöajat laskettiin toiminnallista yksikköä kohti. Olosuhteiksi valittiin normaalit kesäolosuhteet (ei routaa).

Koneiden energiankulutus ja päästöt voivat vaihdella erittäin paljon, koska ne ovat riippuvaisia monesta toisistaan riippumattomasta tekijästä, kuten paikalliset olosuhteet, konetyyppi, koneen kunto ja ikä, käyttäjän tai kuljettajan käyttötavat ja käsiteltävät materiaalit. Tutkimuksessa oletettiin, että työkoneet ja kuljetusvälineet saavat energiansa dieselpolttoaineesta. Ainoastaan tuhkan käsittelyyn käytetyt laitteet voimalaitoksella toimivat voimalaitoksen omalla sähköllä.

Työkoneiden energian- ja polttoaineenkulutus laskettiin käyttöaikojen ja Purasen (1992) julkaisusta saatujen kullekin koneelle lasketun keskimääräisen nimellistehon, käyttötehon ja ominaiskulutuksen avulla. Koneiden päästöt laskettiin käyttäen päästökertoimia, jotka olivat peräisin ruotsalaisista tutkimuksista (Stenström 1989, Stenström 1990).

Muut työkoneiden elinkaaren ajalta aiheutuneet kuormitukset (esim. työkoneiden valmistus) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Poltto- ja räjähdysaineiden valmistus ja kuljetukset jätettiin myös tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden vaikutus oletettiin tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömäksi.

4.3.10 Kuljetukset

Kuljetusmatkoina käytettiin arvioituja keskimääräisiä kuljetusmatkoja pääkaupunkiseudulla. Pääkaupunkiseudulla kiviainekset joudutaan tuomaan usein melko kaukaa. Kalliomurskeet tuodaan 0 - 20 km päästä ja hiekat ja sorat 40 - 70 km päästä (Rasimus 1996). Tässä tutkimuksessa oletettiin, että murske tuodaan 10 km päästä ja hiekka ja sora 50 km päästä 25 tonnin kuorma-autolla. LT/RPT-seoksen kuljetusmatkaksi oletettiin 10 km. Tuhkamassa kuljetettiin 35 tonnin kuorma-autolla. Lisäksi oletettiin, että kiviainekset ja tuhka oli kostutettu pölyämisen estämiseksi. Koska kuljetettavien kiviainesten ja tuhkamassojen pölyämisestä ei löytynyt tietoja, jätettiin se tarkastelun ulkopuolelle.

Kuljetusten energian- ja polttoaineen kulutus laskettiin Haapasen ja Oksasen (1981) kirjassa esitetyllä tavalla. Kuljetusten pakokaasupäästöt laskettiin käyttämällä päästökertoimia, jotka saatiin Mäkelän *et al.* (1996) julkaisusta.

Muut kuorma-autojen elinkaaren ajalta aiheutuneet kuormitukset (esim. autojen valmistus) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

4.3.11 Tien käyttö

Liikenteen aiheuttamat kuormitukset tien käytön aikana jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska olemassa olevilla tiedoilla ei pystytty osoittamaan, että eri vaihtoehdoilla olisi tässä suhteessa eroa.

Tien käytön aikainen kunnossapito, joka sisältää tien korjauksista aiheutuvat kuormitukset, jouduttiin jättämään huomioon ottamatta, koska aiheesta ei löytynyt tarpeeksi tietoja. Samoin muut tien kunnossapidosta (esim. suolaus ja hiekoitus) aiheutuvat kuormitukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

4.4 TIEDON LAATU

Tutkimus tehtiin saatavilla olevia tietoja käyttäen. Tietojen keruussa pyrittiin käyttämään paikallisia tietoja. Jos näitä ei löytynyt, käytettiin ensisijaisesti suomalaista tietoa ja viimekädessä vasta kansainvälistä tietoa. Tiedon hankinta osoittautui joskus vaikeaksi. Tähän oli syynä esimerkiksi se, ettei kyseisiä asioita ollut tutkittu tai mitattu. Tietojen luotettavuus oli joskus myös epävarmaa, kun tiedot perustuivat suppeaan aineistoon. Taulukossa 3 on esitetty eri toimintavaiheiden päätietolähteet.

Taulukko 3. Päätietolähteet eri toimintavaiheissa

Toimintavaihe	Tietolähde
Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen varastointi ja lastaus	Helsingin Energia (Oasmaa 1996)
Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen kuljetukset ja sijoitus maarakenteisiin	Lohja Rudus (Rämö 1997)
Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sijoitus kaatopaikalle	Helsingin Energia (Oasmaa 1996) Blomster 1989 Markkanen 1996 Arovaara 1996
Kallion louhinta	Lemminkäinen (Ruostetoja 1996)
Hiekan ja soran otto	Lohja Rudus (Rasimus 1996)
Kiviainesten murskaus	Lemminkäinen (Ruostetoja 1996) Tielaitos 1994 Tielaitos 1995
Kiviainesten kuljetukset	Lohja Rudus (Rasimus 1996)
Tienrakennus	RIL 156 1995
Saven stabilointi	Karlstedt ja Halkola 1993 Lohja Rudus (Rämö 1997)

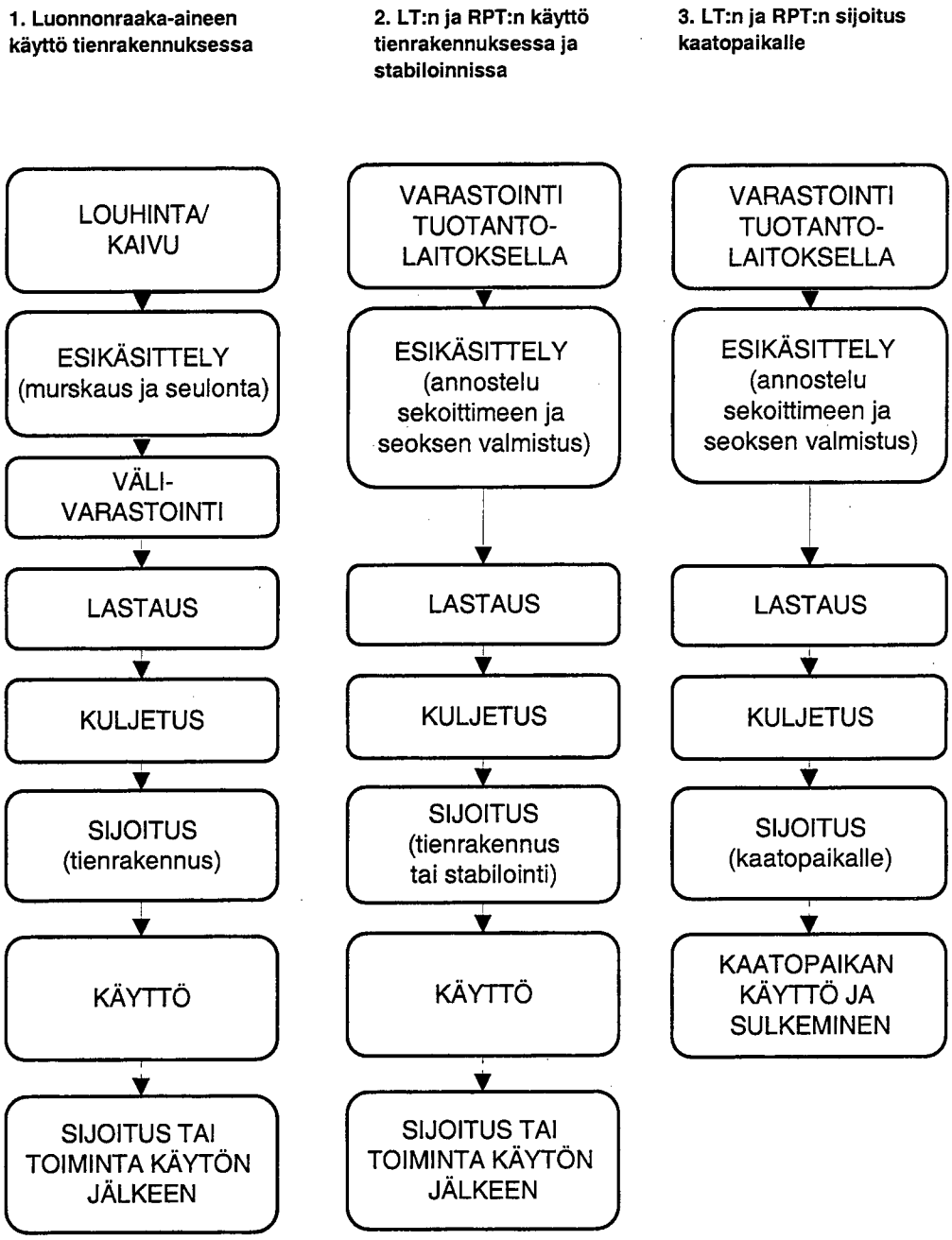
Tiedon saatavuuteen vaikutti sivutuotteiden osalta se, että sivutuotteiden hyötykäyttö on vielä vakiintumatonta. Esimerkiksi tuhkarakentamisen pölypäästöjä eri työvaiheista ollaan vasta tutkimassa. Jatkossa parempaa tietoa lienee saatavissa. Lentotuhkan käytön ympäristövaikutuksia arvioitaessa pölypäästöt olisivat hyvin oleellisia, koska pöly sisältää runsaasti pienhiukkasia, jotka katsotaan terveydelle erittäin haitallisiksi.

Tehdyillä rajauksilla voidaan myös vaikuttaa ratkaisevasti lopullisiin tuloksiin. Siksi on tärkeää, että rajaukset on esitetty tutkimuksessa selkeästi. Tulokset on laskettu käyttäen keskimääräisiä tietoja, laitteita ja koneita, mikä tulee ottaa huomioon myös käytettäessä tämän tutkimuksen tuloksia.

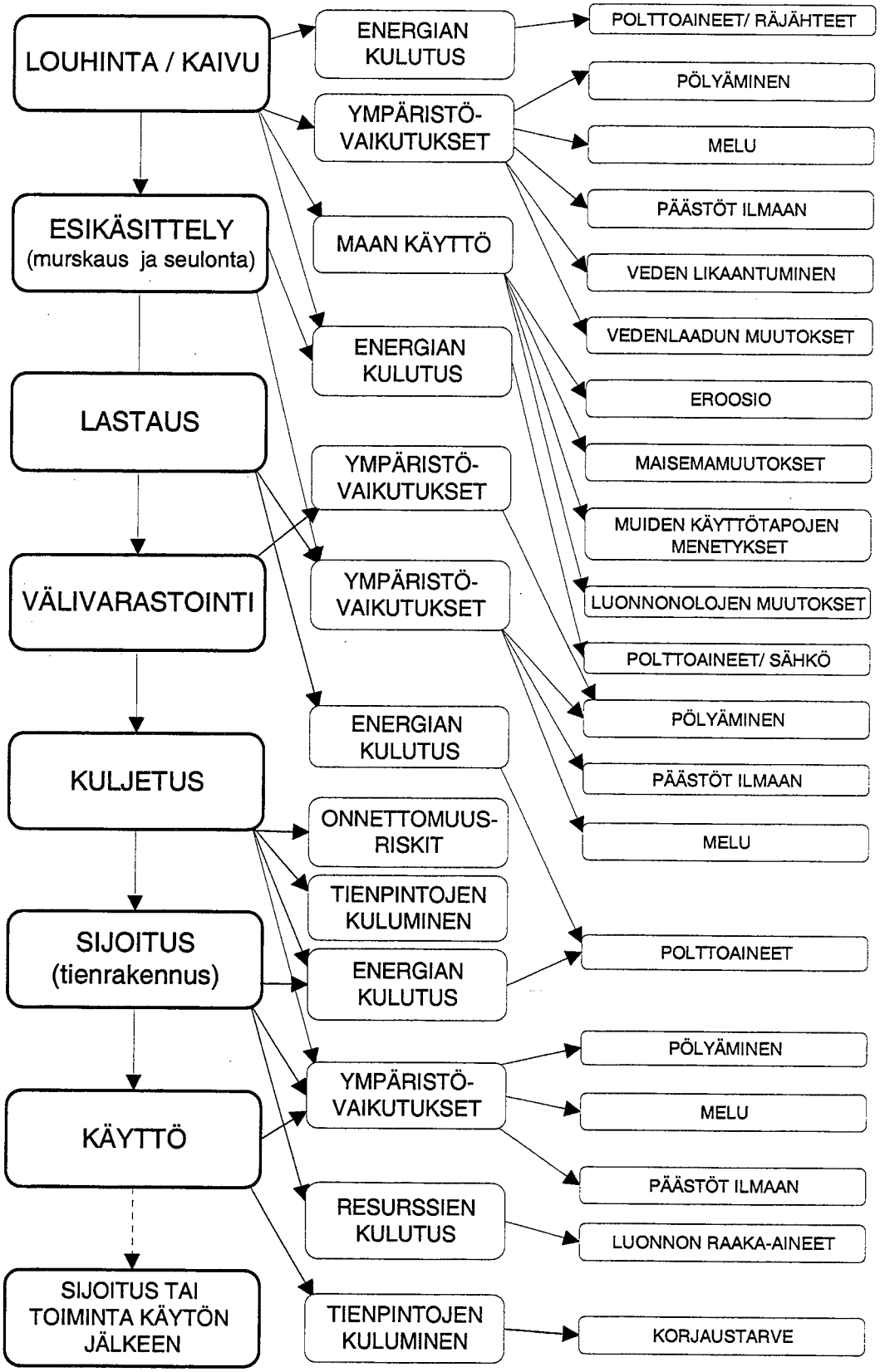
5 TOIMINTAVAIHEET TUTKITTAVISSA VAIHTOEHDOISSA

5.1 TUTKITTAVIEN VAIHTOEHTOJEN VIRTAUSKAAVIOT

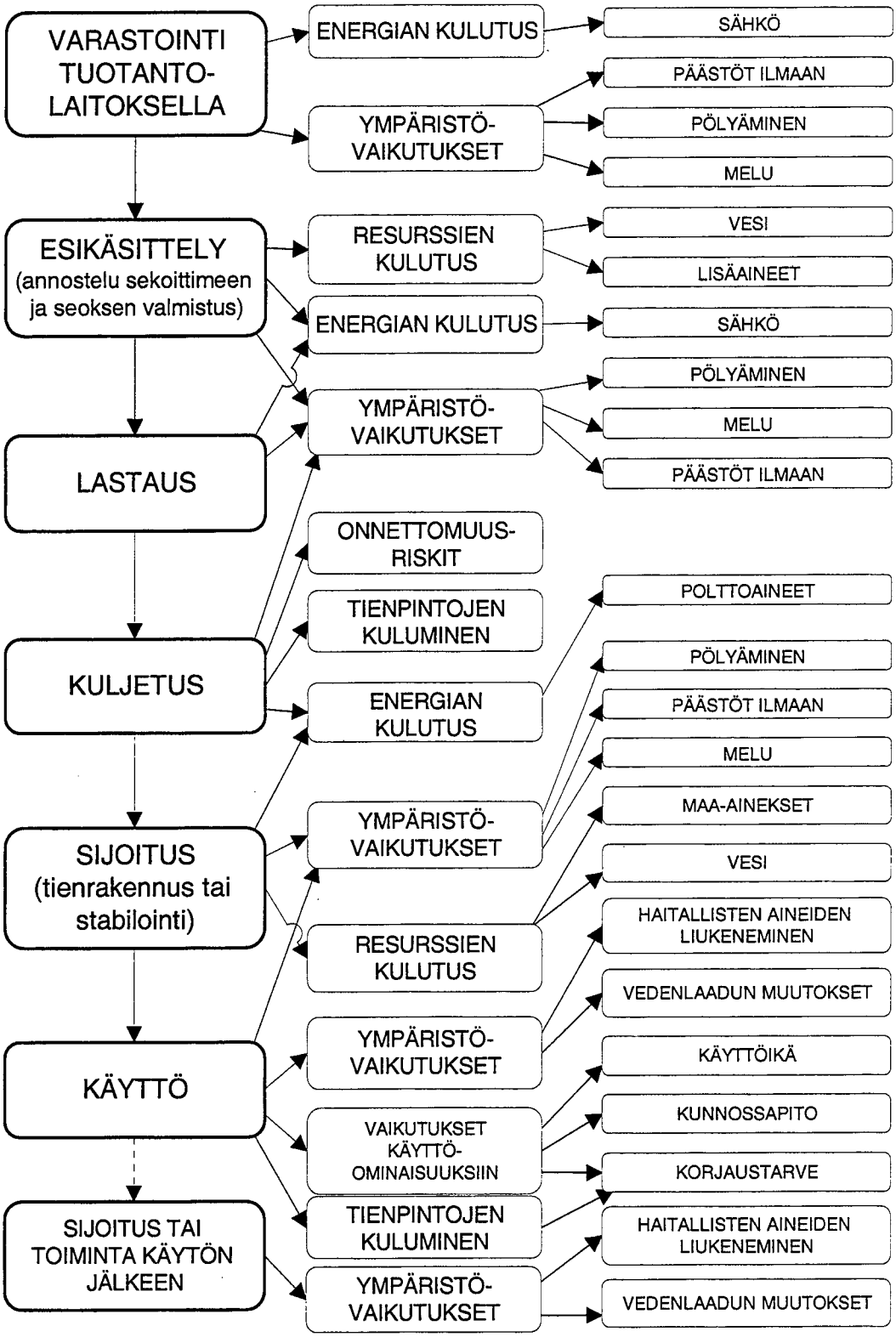
Virtauskaavioissa on esitetty käytettyjen raaka-aineiden elinkaaren eri vaiheet, niiden energian- ja resurssien kulutus sekä tässä tutkimuksessa huomioon otetut ympäristövaikutukset.



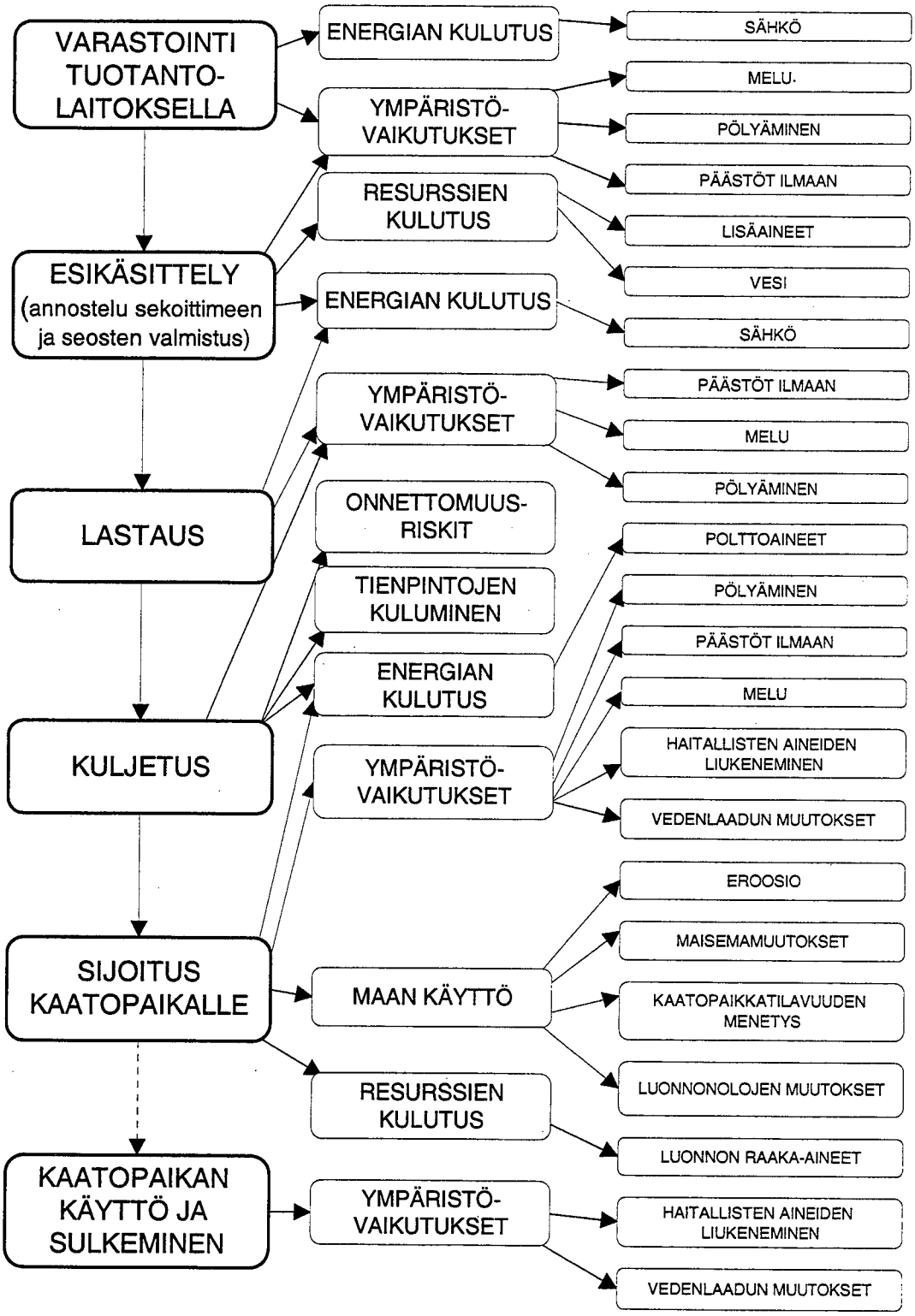
5.1.1 Luonnon raaka-aineen käyttö tienrakennuksessa



5.1.2 Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käyttö tienrakennuksessa tai stabiloinnissa



5.1.3 Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sijoitus kaatopaikalle



5.2 SIVUTUOTTEIDEN HYÖTYKÄYTTÖ

5.2.1 Varastointi, esikäsittely ja lastaus

Helsingin Energian laitoksilla lentotuhka ja rikinpoistotuote siirretään tuotantolaitoksella sähkö- tai letkusuodattimelta omiin siiloihinsa putkia pitkin paineilman avulla. Siiloista lentotuhka, rikinpoistotuote, vesi ja lisäaineet annostellaan sekoittimeen lokeroannostelijalla vaakojen kautta. Annostelija toimii automaattisesti ja annostelee aineet halutun reseptin mukaan. Massan sekoitus tehdään betonisekoittimella (tasosekoitin). Kuormaus tapahtuu pudottamalla massa suoraan sekoittimesta kasettiauton lavalle.

Keskimääräinen varastointiaika tuhkalla ennen kuljetusta eteenpäin tienrakennukseen tai läjitysalueelle on noin 2 vrk. Varastoinnin aikana tapahtuu joskus pölyämistä, mutta se yritetään minimoida kastelemalla. Suotovesiä tai muita ympäristöhaittoja ei varastoinnin aikana aiheudu (Oasmaa 1996).

Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen esikäsittely ja lastaus aiheuttavat melua ja pölypäästöjä voimalaitosalueella. Esikäsittelylaitteet kuluttavat energiaa ja seosten valmistus kuluttaa raaka-aineita (sementti ja vesi).

5.2.2 Kuljetukset

Lentotuhka ja rikinpoistotuote kuljetetaan yleensä optimikosteudessa (14 - 28 %) suoraan voimalaitokselta. Maakosteat massat kuljetetaan avolava kuorma-autoilla suojaamattomina siten, että kuorman pinta on kasteltu. Kastelu vähentää tuhkaseoksen pölyämistä. Yhteen kuorma-autoon mahtuu tuhkaa noin 35 tonnia. Kuormat ovat kevyempiä kuin tavalliset kiviaineskuormat, sillä kostutetun lentotuhkamassan irtotilavuuspaino on noin 1 000 kg/m^3 itd. Toisaalta samankokoisesta kuormasta maakosteaa lentotuhkamassaa syntyy enemmän rakennekuutioita kuin perinteisestä kiviaineksesta, sillä tiivistetyn lentotuhkan tiheys on keskimäärin 1 500 kg/m^3 -rtr ja esimerkiksi soran tiheys on noin 2 000 kg/m^3. Kuivana tuhka kuljetetaan säiliöautolla. Tarvittaessa voidaan valmistaa myös notkeaa betonimassaa muistuttavaa lentotuhkamassaa, joka kuljetetaan työmaalle betoniautolla ja valetaan kohteessa lähes normaalin betonin tavoin.

Tässä tutkimuksessa on kuljetusmatkoina käytetty keskimääräisiä kuljetusmatkoja pääkaupunkiseudulla. Lentotuhkan keskimääräinen kuljetusmatka on 10 - 20 km. Kuljetusmatka vaikuttaa voimakkaimmin lentotuhkan hintaan. Esimerkiksi Helsingin seudulla 15 - 20 km:n kuljetusmatka on vielä kilpailukykyinen soraan verrattuna (Rämö 1996, Lohja Rudus 1995).

Kuljetuksista aiheutuu melu- ja pölyhaittoja sekä päästöjä ilmaan. Kuljetusajoneuvot kuluttavat energiaa polttoaineen muodossa. Lisäksi tienpintojen kuluminen aiheuttaa pölypäästöjä. Kuljetuksiin liittyy aina myös onnettomuusriski.

5.2.3 Sivutuotteiden sijoitus kohteeseen

Lentotuhkarakentamisella on omat rajoituksensa. Ympäristön kannalta lähtökohtana on, ettei tuhkarakenteita saa sijoittaa tärkeille pohjavesialueille. Tuhkarakenteet tulee tehdä 0,7 metriä pohjavesipinnan yläpuolelle ja päällystää vettäläpäisemättömällä kerroksella. Rakenneteknisesti lentotuhka eroaa perinteisestä kiviaineksesta siten, että se vaatii enemmän tiivistämistä kuin tavallinen kiviaines. Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus on 15 - 30 cm riippuen jyräyskertojen määrästä ja jyrän painosta. Tavoitteena on 90 %:n tiiviys parannetulla Proctor-kokeella määritetystä maksimitiiviydestä. Tiivistäminen on suoritettava koetiivistämisen perusteella annettuja tiivistämisohjeita noudattaen. Lentotuhka tulisi ottaa käyttöön työmaalla välittömästi rakennuspaikalle tuonnin jälkeen. Tuhka on tällöin vielä lämmintä ja optimikosteudessa, jolloin edellytykset helpolle tiivistämiselle ja lujittumisprosessin alkamiselle ovat parhaat.

Lentotuhkan huonon vedenläpäisevyyden vuoksi lentotuhkapenkereen pinta tulee tehdä riittävän sivukaltevaksi (vähintään 1 : 100). Lentotuhkarakenne ei roudi, kun se on tiivistetty huolellisesti. Jos lentotuhkasta tehdään tien alempia kerroksia, on veden kapillaarinen nousu estettävä muovikalvolla tai vähintään 250 mm paksulla eristyshiekkakerroksella. Lentotuhkarakenteeseen ei tule sijoittaa teräs- tai valurautaputkia korroosiovaikutusten estämiseksi. Muovi- ja betonirakenteet kestävät sen sijaan lentotuhkan kemiallisia vaikutuksia (Rämö 1996, Lohja Rudus 1995).

Sivutuotteiden sijoituksessa hyötykäyttökohteeseen ehkä suurin ympäristöhaitta on pölyäminen. Pölyämishaittoja voidaan estää käyttämällä kosteaa massaa ja tiivistämällä se heti. Jos lentotuhkaa joudutaan varastoimaan työmaalla, on kasat peitettävä suojapeitteellä tai bitumiemulsiolla. Varastokasat on eristettävä myös alapuolelta eristyshiekkakerroksella tai muovikalvolla liettymishaittojen estämiseksi. Työkoneiden käytöstä aiheutuu lisäksi meluhaittoja ja päästöjä ilmaan. Koneet kuluttavat energiaa ja tienrakennus luonnon raaka-aineita (kiviainekset ja vesi).

Tuhkatiet (A, B ja C)

Eristyskerros tehdään normaalisti hiekasta. Pengertäyte tehdään LT/RPT-seoksesta ja levitetään kerrospengerryksenä puskutraktorilla (PT 08). Tiivistys tehdään kumipyöräjyrällä (JK 20). Jyräyskertoja on 4 ja jyräysnopeus on 5 km/h. Kerroksen tasaus tehdään tiehöylällä (TH 14). Jakava kerros tehdään LT/RPT-seoksesta ja levitetään kerrospengerryksenä puskutraktorilla (PT 08). Tiivistys tehdään kumipyöräjyrällä (JK 20). Jyräyskertoja on 15 ja jyräysnopeus on 10 km/h. Kerroksen tasaus tehdään tiehöylällä (TH 14). Kantavan kerroksen alaosa tehdään LT/RPT-seoksesta ja levitetään kerrospengerryksenä puskutraktorilla (PT 08). Tiivistys tehdään kumipyöräjyrällä (JK 20). Jyräyskertoja on 6 ja jyräysnopeus on 10 km/h. Kerroksen tasaus tehdään tiehöylällä (TH 14). Kantavan kerroksen yläosa tehdään normaalisti murskeesta.

Herttoniemen koetie

Pengertäyttö tehdään louheesta. Louhepenger tasoitetaan lopuksi soralla. Louhe levitetään puskutraktorilla (PT 08) ja tiivistetään vedettävällä täryjyrällä (JT 09). Jyräyskertoja on 6. Sora levitetään puskutraktorilla (PT 08) ja tiivistetään vedettävällä täryjyrällä. Jyräyskertojen määrä on 2 ja jyräysnopeus on 2 km/h. LT/RPT-seos levitetään traktorikaivurilla halutun paksuiseksi kerrokseksi. Koska traktorikaivurin päästötietoja ei löytynyt, laskuissa oletettiin, että LT/RPT-seos levitettiin puskutraktorilla. Tiivistys tehdään päältäohjattavalla sileävalssijyrällä (JV 08) 6 kertaa yliajaen.

Saven stabilointi täyteaineella

Saven stabilointi tehdään pintastabilointina. Täyteainetta, joka sisältää lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta, tuodaan 50 % stabiloitavan saven massasta ja levitetään tasaisesti savipatjan päälle. Savi ja täyteaine sekoitetaan keskenään 22 tonnin telaalustaisella kaivinkoneella ja tiivistetään yliajamalla samalla kaivinkoneella useita kertoja. Pohjarakenteen paksuudeksi tulee noin 1 metri.

5.2.4 Käytön aikaiset ympäristövaikutukset

Kun LT/RPT-rakenne joutuu kosketuksiin veden kanssa, siitä voi liueta haitallisia aineita maaperään. Liuenneet aineet saattavat kulkeutua edelleen pohjaveteen. Lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta eniten liukenevia aineita ovat kalsium, natrium ja kalium sekä erilaiset suolat kuten kloridit, sulfaatit, nitraatit ja nitriitit. Metalleista suurimmat liukoisuudet ovat molybdeenillä, kromilla ja vanadiinilla. Tuotteiden liukoisuus pienenee niiden lujittuessa valmiissa rakenteessa. Merenranta-alueilla suolojen liukenemisen aiheuttamat haitat ovat pienemmät, koska suotovesien suolaisuus ei juuri eroa meren suolaisuudesta (Ranta *et al.* 1987).

Lisäksi tienpintojen kuluminen käytön aikana ja teiden hiekoitus aiheuttaa pölyämistä. Sivutuotteiden käytön vaikutuksista tien käyttöominaisuuksiin, kuten käyttöikään, kunnossapitoon ja korjaustarpeeseen, ei löytynyt materiaalia. Nämä asiat tulisi jatkossa selvittää, sillä niillä voi olla merkittävä vaikutus tien elinkaaren aikaisiin ympäristökuormituksiin.

5.3 SIVUTUOTTEIDEN KAATOPAIKKASIJOITUS

5.3.1 Varastointi, lastaus ja kuljetukset

Tapahtuvat samoin kuin kohdassa 5.2.1.

5.3.2 Sivutuotteiden sijoitus läjitysalueelle

Lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta on viety pääkaupunkiseudulla ainakin Vantaan Pitkäsuon ja Espoon Ämmässuon sekä Helsingin Malminkartanon ja Vuosaaren läjitysalueille. Kaikilla em. läjitysalueilla on jatkuva suotoveden laatuseuranta.

Vuosaaren läjitysalue on salaojitettu ja sen suotovedet menevät suoraan vedenpuhdistamolle (Arovaara 1996).

Liettyvien ja heikosti kantavien maamassojen sijoittaminen vaatii erikoistoimenpiteitä, jotta mäen stabiliteetti saadaan riittäväksi. Täyttömäet tehdään yleensä nk. viipalemenetelmällä, jossa mäki rakentuu vierekkäin ja päällekkäin olevista allasrakenteista, jotka täytetään liettyvillä aineksilla, esim. savella, lentotuhkalla ja rikinpoistotuotteella. Täydet altaat peitetään hyvin vettäläpäisevällä suodatinkerroksella ja tämän päälle rakennetaan uusia allaskerroksia. Lentotuhka ja rikinpoistotuote tuodaan kostutettuna optimivesipitoisuuteen. Tukipenkereet (allasrakenteen seinät) rakennetaan louheesta. Pitkäsuon täyttömäellä altaiden leveys on 37,5 m ja pituus keskimäärin 100 m. Penkereiden korkeus on 3,5 m ja harjan leveys on 8 m. Altaiden keskimääräinen tilavuus on 13 000 m^3. Louhetta kuluu yhtä allasta kohden noin 3 850 m^3. Tarvittavan louheen määrä on noin 30 - 50 % läjitetystä jätemäärästä (Blomster 1989, Karlstedt ja Halkola 1993).

Materiaali levitetään puskutraktorilla ohuiksi kerroksiksi (kerrospaksuus n. 0,3 m), jotka tiivistetään levityksen yhteydessä yliajamalla levityskoneella. Levityskoneen painon tulee olla vähintään 15 tonnia ja ylityskertojen määrä 4 - 6, jotta materiaali tiivistyy kunnolla. Altaat peitetään savella tai kiviaineksella tai molemmilla. Muuten täyteaineksia ei eristetä. Savi estää sadeveden pääsyä altaisiin ja tuhkan lujittuminen hidastaa omalta osaltaan haitta-aineiden liukenemista suotovesiin. Allasrakenteen reunat toimivat salaojina, jotka johtavat suotovedet pois. Sitä mukaa kuin täyttömäki valmistuu sen reunat verhotaan täytemaalla ja metsitetään sadevesien suotautumisen minimoimiseksi (Markkanen 1996, Oasmaa 1996, Blomster 1989).

Tässä tutkimuksessa oletettiin, että täyteaineen levitys- ja tiivistyskoneena käytetään puskulevyllä varustettua kumipyöräjyrää (JK 20 P). Levitys tehdään kerrospengerryksenä kerrospaksuuden ollessa 0,3 metriä. Louhepenkereet tehdään kiilamaisena päätypengerryksenä puskutraktorilla (PT 08). Pengerpaksuus on 3,5 metriä.

5.3.3 Läjitysaluesijoitukse n ympäristövaikutukset

Maantäyttöalueen rakentaminen aiheuttaa ympäristölleen maisemamuutoksia ja luonnonolojen muutoksia sekä mahdollisesti eroosiota. Jätteen kuljetuksesta ja levityksestä aiheutuu melua ja pölyämistä sekä päästöjä ilmaan. Jätteestä liukenee pinta- ja pohjavesiin epäpuhtauksia, jotka aiheuttavat muutoksia veden laadussa.

Rikinpoistotuotteesta (märkä-kuivamenetelmän jätteestä ja märkämenetelmän jätteestä eli kipsijätteestä) liukenee lähinnä epäorgaanisia suoloja, kuten sulfaatteja ja klorideja sekä kalsiumia, natriumia ja kaliumia. Lisäksi kipsijätteestä liukenee magnesiumia ja märkä-kuivamenetelmän suotovesistä nitriittejä ja nitraatteja. Rikinpoistotuotteesta liukenee myös pieniä määriä haitallisia metalleja, kuten kromia, molybdeeniä, vanadiinia, arseenia ja sinkkiä (Ranta *et al.* 1987).

Lentotuhkasta liukenee lähinnä sulfaatteja, klorideja, natriumia ja kaliumia. Haitallisista metalleista eniten liukenee kromia, molybdeeniä ja vanadiinia. Booria ja kalsiumia liukenee myös pieniä määriä. Useiden tutkimusten mukaan haitallisten metallien pitoisuudet ovat pienemmät rikinpoistojätteen kuin lentotuhkan suotovesissä (Ranta *et al.* 1987).

Vantaan Pitkäsuon läjitysalueelle on sijoitettu vuosien 1989 - 1995 aikana 927 000 m^3 jätettä, josta 178 000 m^3 on rikinpoistotuotetta (kipsijätettä ja märkäkuivamenetelmän jätettä), lentotuhkaa ja pohjatuhkaa. Alueen suoto- ja valumavesiä on tarkkailtu koko alueen olemassaoloajan. Alueen pintavedet virtaavat Pikkujärven kautta Espoon Pitkäjärveen. Suotovesien likaantumisen (BHK ja typpipitoisuus ovat olleet kohonneita ja vesi on ollut paikoitellen hapetonta) vuoksi vedet on lammikoitu tasausaltaaseen, josta ne on johdettu ylivuotona sepelisuodattimen kautta purkuojaan. Pitkäsuon valumavesien kloridi-, sulfaatti- ja kalsiumpitoisuudet ovat olleet korkeita. Myös useiden raskasmetallien pitoisuudet ovat olleet kohonneita (purovesien keskiarvoon verrattuna noin 5 - 20 kertaisia). Haitallisten aineiden pitoisuudet ovat olleet kuitenkin alhaisia tai melko alhaisia vesieliöille selviä haittoja aiheuttaviin tasoihin verrattuna. Pitkäsuon alueen pohjavesissä ei ole ollut havaittavissa täyttöalueen vaikutusta.

Helsingin Malminkartanon läjitysalueelle on sijoitettu vuosina 1988 - 1993 Salmisaaren voimalaitoksen rikinpoiston lopputuotetta. Täyttömassan seossuhteena on käytetty: rikinpoiston lopputuotetta n. 50 % kuiva-aineesta, lentotuhkaa n. 50 % kuiva-aineesta ja vettä n. 24,5 % kuiva-aineiden määrästä (vuonna 1992). Alueen suotovesiseuranta aloitettiin vuonna 1988. Suotovesitulokset osoittavat, että rikinpoiston lopputuotteen läjitysalueelta liukenee valumavesiin etenkin kalsiumia, magnesiumia, sulfaatteja ja klorideja. Jossain määrin ovat nousseet myös kromin, sinkin, kuparin, bariumin ja kadmiumin pitoisuudet.

Helsingin Vuosaaren maantäyttöalueella tehtiin suotovesiseurantaa vuoteen 1991 asti, jonka jälkeen alueen vedet on johdettu HKVV:n viemäriverkostoon ja edelleen jätevedenpuhdistamoon puhdistettavaksi. Vuonna 1990 Vuosaaren täyttöalueen ohi virtaavassa purossa olivat sulfaatti-, kloridi-, kalsium-, magnesium- ja bariumpitoisuudet kohonneita. Raskasmetallien pitoisuudet eivät olleet nousseet.

Kaikilla edellä mainituilla maantäyttöalueilla ovat liuenneiden aineiden pitoisuudet pintavesissä kohonneet joka vuosi kahdeksan vuoden aikana. Tämä tarkoittaa sitä, että suoto- ja valumavesiseurantaa täytyy jatkaa useita vuosia vielä täyttöalueen sulkemisen jälkeen, sillä alueen vesitasapainon saavuttaminen vie pitkän ajan.

5.4 LUONNONMATERIAALIEN KÄYTTÖ

5.4.1 Kallion louhinta

Kallion louhinta tapahtuu poraamalla ja räjäyttämällä. Louhinnassa tulee pyrkiä siihen, että louheen koko on mahdollisimman sopiva murskaimelle ja jälkilouhinta jää mahdollisimman vähäiseksi. Jälkilouhinta eli rikotus tehdään esim. hydrauli-

vasaralla. Louhe lastataan kaivinkoneella tai hihnakuljettimella ja siirretään murskauslaitoksen syöttimeen aluksi kaivinkoneella tai raskaalla pyöräkuormaajalla ja myöhemmin välimatkan pidetessä dumpperilla tai maansiirtoautolla. Soran ja hiekan otto tapahtuu kaivinkoneella (RIL 156 1995, Ruostetoja 1997).

Tässä tutkimuksessa oletettiin, että kallion louhinnassa poraus tehdään päältälyövällä poravaunulla (Tamrock 600S). Panostus suoritetaan ejektoriperiaatteella toimivalla panostuslaitteella (Portanol) käyttäen räjähdysaineena ANOa (ammoniumnitraattia). Ylisuurten lohkareiden rikotus tehdään keskikokoisella hydraulivasaralla (Rammer 82). Louhe lastataan kaivinkoneella (CAT 350) 35 tonnin maansiirtoautoon, jolla se kuljetetaan murskaamoon.

Maanpäällisissä louhinnoissa käytettävät laitteet toimivat yleensä dieselmoottorilla, josta aiheutuu päästöjä ilmaan. Louhinta aiheuttaa lisäksi pöly- ja melupäästöjä. Louhinnan yhteydessä pölyä pääsee ilmaan lähinnä porauksen, räjäytysten ja louheen käsittelyn yhteydessä. Poraus on merkittävä pölylähde, sillä siinä pölyä syntyy runsaasti ja varsin jatkuvasti. Louhinnassa melua aiheuttavat toiminnot ovat panoskenttien poraus ja räjäytykset sekä ylisuurien lohkareiden rikotus (Tielaitos 1995).

5.4.2 Hiekan ja soran otto

Tässä tutkimuksessa oletettiin, että hiekan ja soran otto tapahtuu hydraulisella kaivinkoneella (KKH 17).

Maa-ainesten otosta aiheutuu maaperän vaurioitumista, maiseman ja alkuperäisen harjuluonnon muuttumista sekä pohjaveden laadun muutoksia ja likaantumista. Pohjaveden pinnankorkeuden ja laadun vaihtelut ovat suurempia soranottoalueilla kuin luonnontilaisilla pohjavesialueilla. Soranottoon liittyviä likaantumisriskejä aiheuttavat lisäksi esim. työkoneiden öljy- ja kemikaalivuodot sekä sorakuoppien täyttö jätemailla ja ylijäämämassoilla (Hatva *et al.* 1993).

5.4.3 Murskaus, seulonta ja pesu

Louhittu kiviaines sopii harvoin sellaisenaan maanrakennukseen. Kiviaineksen jalostus tapahtuu murskaamoissa. Murskauslaitoksen peruskoneet ovat murskaimet ja seulat. Murskausvaiheiden mukaan laitokset ryhmitellään yksi-, kaksi- tai kolmivaihelaitoksiin. Luonnonkiviaineksen murskauksessa tarvitaan yleensä kaksi tai kolme vaihetta. Murskeet seulotaan halutun kokoisiin jakeisiin ja tarvittaessa pestään. Materiaali siirretään useimmiten hihnakuljettimilla. Lisäksi murskauslaitokseen kuuluu raaka-aineen syöttölaite, erilaisia käyttölaitteita sekä valmiin tuotteen kuormaussiilot. Kiinteiden murskauslaitosten lisäksi on olemassa siirrettäviä laitoksia. Murskaamolaitteet voivat toimia sähköllä tai kevyellä polttoöljyllä (Matilainen 1986, Rasimus 1996).

Kolmivaihemurskaamo toimii esim. seuraavalla tavalla (ympäristölupa):

Murskaamon syötteenä oleva louhe kuormataan pyöräkuormaajalla syöttimeen, joka annostelee sen esimurskaimena toimivaan leukamurskaimeen. Murskautunut kiviaines putoaa hihnakuljettimelle, joka vie sen välimurskaimeen (karamurskain). Tarvittaessa voidaan hienoin osa murskeesta erottaa tässä vaiheessa seulomalla. Välimurskaimesta tuleva murske putoaa edelleen hihnakuljettimelle, joka vie sen kaksi- tai kolmitasoseulalle. Seulan eri tasoilta tulevat lajitteet ohjataan hihnakuljettimilla joko takaisin välimurskaimeen, jälkimurskaimeen tai valmiiden tuotteiden osalta varastosiiloihin tai kasoihin. Jälkimurskaus tapahtuu kara- tai kartiomurskaimella riippuen tuotettavista lajitteista. Jälkimurskaimesta putoava edelleen hienontunut murske putoaa hihnakuljettimelle, joka vie sen edelleen kaksi- tai kolmitasoseulalle. Seulan eri tasoilta tulevat lajitteet ohjataan jälleen joko takaisin väli- tai jälkimurskaimeen edelleen murskattavaksi tai valmiiden tuotteiden siiloihin tai kasoihin. Siiloista tai varastokasoista valmiit tuotteet siirretään pyöräkuormaajalla tai kuorma-autolla lopulliseen varastoon.

Murskaamojen ympäristöhaitoista tärkeimmät ovat pöly- ja melupäästöt sekä pohjaveden likaantumisriski. Lisäksi murskaamon käyttämän energian tuotanto aiheuttaa päästöjä ilmaan. Murskauslaitoksen merkittävimmät pölyä tuottavat käsittelyvaiheet ovat kiviainesten pudotukset sekä murskaus ja seulonta. Murskaamon pölyn leviämistä ympäristöön voidaan rajoittaa pölylähteiden koteloinnilla, kastelulla ja tuulisuojilla. Murskaamon melu aiheutuu samanaikaisesti useista laitteista. Tärkeimmät niistä ovat murskaimet ja seulat. Lisäksi melua aiheuttavat mm. kuljettimet ja mahdollinen generaattori. Murskaamon selvästi tärkein melulähde on esimurskain. Sähkökäyttöisillä murskaamoilla pohjaveden likaantumisriski on vähäinen. Suurempi pohjaveden likaantumisriski on laitoksilla, joiden energia tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla esim. kevyellä polttoöljyllä (Matilainen 1986, Tielaitoksen selvityksiä 43/93, Tielaitos 1995).

5.4.4 Varastointi, lastaus ja kuljetukset

Kiviainesten varastointi tapahtuu varastokasoissa tai siiloissa. Kasoissa varastoinnista voi aiheutua pölyhaittoja, joita ehkäistään kiviainesta kastelemalla. Varastointi kuljetuksineen on suoritettava siten, että murskaustuotteen rakeisuus saadaan pysymään tasalaatuisena. Lähekkäin varastoitavien eri tuotteiden sekoittuminen on myös estettävä (Matilainen 1986).

Kiviaines siirretään kasoista kaivinkoneella tai siiloista suoraan kuorma- tai maansiirtoautoon, joka kuljettaa ne kohteeseen. Pääkaupunkiseudulla kiviainekset joudutaan tuomaan usein melko kaukaa. Kalliomurskeet tuodaan 0 - 20 km päästä ja hiekat ja sorat 40 - 70 km päästä (Rasimus 1996).

Kiviainesten lastauksesta ja kuljetuksista aiheutuu huomattavia pöly- ja melupäästöjä sekä pohjaveden likaantumisriskejä. Lisäksi käytetyt työkoneet ja kuljetusvälineet aiheuttavat päästöjä ilmaan. Kuormaus- ja kuljetusvälineiden melu voi hetkellisesti nousta korkeaksi. Etenkin kuivina aikoina ajoneuvot irrottavat päällystämättömästä maasta pölyä, mutta päästökorkeuden mataluus pienentää pölystä aiheutuvaa haittaa. Ajonopeudella on suuri vaikutus irtoavan pölyn määrään (Tielaitos 1995).

5.4.5 Tienrakennus

Kadun päällysrakenne mitoitetaan kantavuuden tai routivuuden tai molempien mukaan (Katu 90 1991).

Maamateriaalien ja louheen levittämisessä käytetään pääasiassa tela- ja pyöräpuskutraktoreita. Konevalintaan vaikuttavat mm. tarvittava suorituskyky ja pengertämistapa. Hiekka ja soramassojen levittämiseen riittää yleensä kevyt telapuskutraktori (tyypiltään PT 05-08). Tässä tutkimuksessa oletettiin, että hiekka ja sora levitetään 8 tonnin painoisella telapuskutraktorilla (PT 08) ja murskekerros levitetään tiehöylällä (TH 14).

Kerrosten tasaus ja profilointi tehdään yleensä tiehöylällä (TH 14 tai 16), telapuskutraktorilla tai erityisellä luiskakoneella. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että kerrosten tasaus tehdään 14 tonnin painoisella tiehöylällä (TH 14).

Maarakenteiden tiivistyksessä käytetään etupäässä itsekulkevia täryjyriä tai staattisia jyriä (esim. JK 20 tai JT 06-09). Levitys- ja tiivistystyö voidaan myös yhdistää käyttämällä puskulevyllä varustettua jyrää (esim. JK 20 P). Tiivistystyön lopputulokseen vaikuttavat maalajin (rakeisuuden) ohella käytetty konevalinta, oikea jyräysmäärä sekä materiaalin oikea vesipitoisuus ja lämpötila. Maakerrosten tiivistys tehdään yleensä useampana kerroksena. Suositeltavat enimmäiskerrospaksuudet vaihtelevat jyrätyypistä ja tiivistettävästä maalajista riippuen. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että tiivistykset tehdään kumipyöräjyrällä (JK 20). Ainoastaan louhekerroksen tiivistys oletettiin tehdyksi täryjyrällä (JT 09). Kantavan murskekerroksen tiivistyksen aikana kerros kasteltiin tiivistysten välillä kahteen kertaan. Kastelu tehtiin vesisäiliöllä varustetulla kuorma-autolla.

Tie päällystetään asfaltilla, joka voidaan levittää käsin tai koneella. Valtaosa asfalttimassoista levitetään nykyään levityskoneella. Levityskone levittää asfaltin tasaiseksi kerrokseksi tien pintaan, suorittaa esitiivistyksen ja tekee asfalttipinnan lopullisen tasoituksen. Päällystystyössä käytetään tiivistysvälineinä yleensä sileävalssi-, kumipyörä- tai täryjyriä (esim. JT 06-09 tai JK 20) (RIL 156 1995).

Tienrakennus aiheuttaa ympäristöönsä pölypäästöjä, joita voidaan ehkäistä kostuttamalla kiviaineksia. Tienrakennuskoneiden käytöstä aiheutuu lisäksi meluhaittoja ja päästöjä ilmaan. Koneet kuluttavat energiaa ja tienrakennus luonnonvaroja (maa-ainekset, lisäaineet ja vesi).

5.4.6 Tien käytön aikaiset ympäristövaikutukset

Tien käytön aikana kuormituksia aiheuttavat ovat mm. tienpintojen kuluminen käytön aikana ja teiden hiekoitus, jotka aiheuttavat pölyhaittoja. Teiden suolauksesta taas aiheutuu pohjavesien likaantumisriski. Lisäksi tien käytön aikaisiin ympäristövaikutuksiin kuuluvat teiden korjausten aiheuttamat kuormitukset, joita ovat esimerkiksi raaka-aineiden ja energian kulutus sekä päästöt. Eri materiaaleista tehdyn rakenteen kestävyys on selvästi erilainen, mikä aiheuttaa erilaisen

korjaustarpeen. Korjausten vaikutukset tulisi jatkossa ottaa mukaan materiaalien vertailuun.

5.4.7 Saven stabilointi sementillä

Tässä tutkimuksessa oletettiin, että saven stabilointi tehdään pintastabilointina, jossa stabiloitavan kerroksen päälle levitetään sideainetta traktorilla (TR 55) vedettävällä jauheenlevittimellä ja massa sekoitetaan traktorilla (TR 55) vedettävällä stabilointijyrsimellä kahdella yliajokerralla. Kerroksen tiivistys tehdään vedettävällä täryjyrällä (JT 09) kuudella ajokerralla. Sideaineena käytetään sementtiä, jota lisätään 7 % saven kuiva-ainemäärästä (Karlstedt ja Halkola 1993).

6 YMPÄRISTÖKUORMITUKSET JA -VAIKUTUKSET

Vertailtaessa tierakenteiden elinkaaren aikaisia ympäristökuormituksia ja -vaikutuksia, vaihtoehdot olivat seuraavat:

1. Tuhkatiet A, B ja C (tyypillinen lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävä tie)
2. Kivitie 1 (luonnon raaka-aineista tehty tie) + läjitys

Tuhkatietä ei voitu sellaisenaan verrata kivitiehen, vaan kivitien ympäristövaikutuksiin lisättiin läjitysaluesijoituksen ympäristövaikutukset.

Herttoniemen koetie ei ollut suoraan verrannollinen edellisiin tievaihtoehtoihin, vaikka siihen sijoitettu sivutuotemäärä oli sama. Tämä johtui siitä, että tarkasteltavat tieosuudet olivat eri kokoisia. Herttoniemen koetietä verrattiin omaan vertailuvaihtoehtoonsa (kivitie 2 + läjitys).

Ylijäämäsaven stabiloinnissa vertailukohteina olivat:

1. Täyteainestabilointi (saven stabilointi täyteaineella)
2. Sementtistabilointi (saven stabilointi sementillä)

Työkoneiden energiankulutus ja pakokaasupäästöt laskettiin koneiden käyttöaikojen perusteella käyttäen päästökertoimia (Puranen 1992). Päästömäärien arviointi perustui koneiden tekemään työhön eli niiden käyttämään energiaan (E). Tämä laskettiin seuraavasti:

$$E = P \bullet k/100 \bullet T, \text{ missä} \qquad (1)$$

E = kokonaisenergia (kWh)
P = nimellisteho (kW)
k = käyttöteho (%)
T = käyttöaika

Purasen julkaisussa on annettu kullekin työkoneryhmälle keskimääräinen nimellisteho ja käyttöteho, joita käytettiin energiankulutusten laskemiseen.

Pakokaasupäästömäärät saatiin suoraan kertomalla käytetty energia päästökertoimella, joka on erilainen eri päästökomponenteille. Päästökertoimet on esitetty Purasen julkaisussa (1992) koneluokittain taulukoituna.

Työkoneiden polttoaineen kulutus laskettiin seuraavalla kaavalla (Puranen 1992):

$Q = E \bullet Q / \rho$, missä (2)

E = käytetty energia (kWh)
q = ominaiskulutus (g/ kWh)
ρ = polttoaineen tiheys = 0,85 g/ l (dieselöljy tai kevyt polttoöljy)

Purasen julkaisussa (1992) on annettu kunkin työkoneryhmän ominaiskulutus. Liitteestä A löytyy taulukoituna eri vaihtoehtojen käyttöajat, pakokaasupäästöt, melu- ja pölypäästöt sekä energian- ja polttoaineenkulutukset työvaiheittain ja -koneittain eriteltynä. Näiden tulosten laskeminen on esitetty yksityiskohtaisesti erillisessä raportissa (Eskola 1997).

Sementtiä käytettiin saven stabiloinnissa ja lisäaineena joissakin tierakenteissa. Sementin valmistuksen aiheuttamat päästöt on otettu suoraan Häkkisen ja Mäkelän (1996) julkaisusta.

6.1 RAAKA-AINEIDEN KULUTUS

Sijoitetut sivutuotemäärät (LT/RPT-seokset) toiminnallista yksikköä kohden eri vaihtoehdoissa on esitetty taulukossa 4. Läjityksessä ja täyteainestabiloinnissa oletettiin, että sivutuotteita sijoitetaan sama määrä kuin tuhkatiehen A ja muut tarvittavat raaka-aineet laskettiin suhteessa tähän määrään. Samoin tehtiin Herttoniemen koetien suhteen. Siinä määriteltiin tarkasteltavan tieosuuden pituus (toiminnallinen yksikkö) olettaen, että sijoitettujen sivutuotteiden määrä on sama kuin tuhkatiessä A. Herttoniemen koetiehen saataisiin sijoitettua tien pituutta kohti huomattavasti enemmän sivutuotteita, koska siinä sivutuotteesta rakennettu jakava kerros on hyvin paksu (4,15 m). Tässä tutkimuksessa jouduttiin kuitenkin tarkastelemaan lyhyempää tieosuutta, joten Herttoniemen koetien materiaalien kulutukset eivät ole verrannollisia tuhkatiehen ja kivitiehen 1.

Tuhkateihin kului 11 180 - 11 530 t/km LT/RPT-seoksia riippuen seossuhteista.

Taulukko 4. Uusioraaka-ainemäärät toiminnallista yksikköä kohden eri vaihtoehdoissa.

	Tuhkatie A t/km	Tuhkatie B t/km	Tuhkatie C t/km	Koetie1 t/338 m	Koetie2 t/338 m	Läjitys t/yksikkö	Täyteaine-stabilointi t/yksikkö
90/10-seos[1]	1920	11530	11434	780	741	1920	1920
70/30-seos[1]	9260	-	-	10400	10400	9260	9260
yhteensä	11180	11530	11434	11180	11141	11180	11180

[1] sisältävät myös veden

Taulukko 5. Luonnon raaka-aineiden kulutus toiminnallista yksikköä kohden eri vaihtoehdoissa.

	Tuhka-tie A t/km	Tuhka-tie B t/km	Tuhka-tie C t/km	Kivi-tie1 t/km	Kivi-tie1 +läjitys t/km	Koe-tie1 t/338 m	Koe-tie2 t/338 m	Kivi-tie2 t/338 m	Kivi-tie2 +läjitys t/338m	Läji-tys t/yks.	Sement-tistabi-lointi t/yks.
murske	4860	4860	4860	4860	4860	990	990	990	990	-	-
hiekka	7700	7700	7700	7700	7700	-	-	-	-	-	-
louhe	-	-	-	1001	16947	1400	1400	16700	22737	6037	-
sora	-	-	-	9240	9240	640	640	640	640	-	-
kalkkikivi[2]	-	115	-	-	-	-	46,8	-	-	-	894
savi[2]	-	38,3		-	-	-	15,6	-	-	-	298
yhteensä	13810	13963	13810	3306	39997	3284	3346	18584	24621	6037	1192

[2] sementin raaka-aine

Taulukoista 5 ja 6 voidaan nähdä luonnon raaka-aineiden ja veden kulutus eri vaihtoehdoissa. Murskeen ja hiekan kulutus oli sama tuhka- ja kivitiessä. Kivitie1+läjitys-vaihtoehto erosi tuhkatiestä siten, että se kulutti suuret määrät louhetta ja soraa. Louhetta kului noin 16 950 t/km ja soraa 9 240 t/km. Edellä mainittujen raaka-aineiden lisäksi tien päällystykseen kului asfalttia. Asfalttia kului tuhkateihin ja kivitie1-vaihtoehtoon 1 250 t/km ja Herttoniemen koetiehen ja sen vertailuvaihtoehtoon 254 t/338 m.

Herttoniemen koetiessä kului louhetta 1 400 t/338 m ja soraa 640 t/338 m. Herttoniemen koetiessä ei kulunut lainkaan hiekkaa. Kivitie2+läjitys-vaihtoehdossa kului louhetta 22 737 t/338 m, mikä oli vielä suurempi määrä kuin kivitiessä 1.

Sementtiä lisättiin tuhkatien C ja Herttoniemen koetien 2 kantavan kerroksen alaosiin sekä sementtistabiloinnissa stabiloitavaan savikerrokseen. Sementtistabiloinnissa sementtimäärä laskettiin täyteainestabiloinnin savimäärää kohden. Tuhkatiehen sementtiä kului 96 t/km, Herttoniemen koetiehen 39 t/338 m ja sementtistabilointiin 745 t/yksikkö.

Sementin pääraaka-aineet ovat kalkkikivi (75 %) ja savi (25 %). Lisäaineina voidaan käyttää esim. kalkkia (Weiss 1985). Tässä tutkimuksessa oletettiin käytettävän pelkästään kalkkikiveä ja savea. Koska sementin valmistuksessa kuluu kalkkikiveä 1 200 g/kg sementtiä (Häkkinen ja Mäkelä 1996), kalkkikiveä kului tuhkatiehen 115 t/km, Herttoniemen koetiehen 46,8 t/338m ja stabilointiin 894

t/yksikkö. Savea kuluu 400 g/kg sementtiä, joten savea kului tuhkatiehen 38,3 t/km, Herttoniemen koetiehen 15,6 t/338 m ja stabilointiin 298 t/yksikkö.

Taulukko 6. Veden kulutus toiminnallista yksikköä kohden eri vaihtoehdoissa

	Tuhka-tie A t/km	Tuhka-tie B t/km	Tuhka-tie C t/km	Kivi-tie1 t/km	Kivitie1 +läjitys t/km	Koe-tie1 t/338m	Koe-tie2 t/338m	Kivi-tie2 t/338m	Kivitie2 +läjitys t/338m	Läjitys t/yks.	Täyteaine-stabilointi t/yksikkö
seosvesi	2236	2306	2287	-	2236	2236	2228	-	2236	2236	2236
kasteluvesi	354	354	354	354	354	72	72	72	72	-	-
vettä yht.	2590	2660	2641	354	2560	2308	2300	72	2308	2236	2236

LT/RPT-seoksiin lisättiin vettä jo voimalaitoksella. Massat kostutettiin mahdollisimman lähelle optimivesipitoisuutta, joka vaihtelee 14 ja 28 % välillä. Olettiin, että LT/RPT-massojen vesipitoisuus oli 20 %. LT/RPT-massoihin lisätyt vesimäärät ilmenevät taulukon 6 kohdasta seosvesi.

Vettä kului myös tien rakennusvaiheessa kerrosten kasteluun. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että ainoastaan kantava kerros kasteltiin tiivistysten välillä. Vettä kului kasteluun yhtä paljon (354 t/km) tuhkateissä ja kivitiessä 1. Herttoniemen koeteissä ja kivitiessä 2 kului kasteluvettä 72 t/338 m.

Lisäksi vettä kului eri vaiheissa kiviainesten pölyämisen estämiseen kastelun avulla. Näitä vesimääriä ei pystytty arvioimaan tässä tutkimuksessa ja ne jätettiin huomioon ottamatta.

Taulukko 7. Raaka-aineiden kokonaiskulutus toiminnallista yksikköä kohden eri vaihtoehdoissa

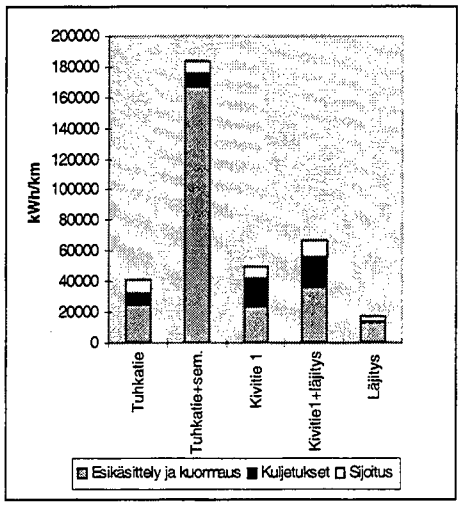
	Tuhka-tie A t/km	Tuhka-tie B t/km	Tuhka-tie C t/km	Kivi-tie1 t/km	Kivi-tie1 +läjitys t/km	Koe-tie1 t/338m	Koe-tie2 t/338m	Kivi-tie2 t/338m	Kivi-tie2 +läjitys t/338m	Läji-tys t/yks.	Täyte-aine-stabil. t/yks.	Sement-tistabil. t/yks.
Uusio-r-a	11180	11530	11434	-	11180	11180	11141	-	11180	11180	11180	-
Luonnon-r-a	13810	13906	13810	33060	39997	3284	3346	18584	24621	6037	-	1192
Kasteluvesi	354	354	354	354	354	72	72	72	72	-	-	-
yhteensä	25344	25694	25598	33414	51531	14536	14559	18656	35873	17217	11180	1192

Taulukosta 7 nähdään raaka-aineiden kokonaiskulutus eri vaihtoehdoissa. Nähdään, että kiviteiden raaka-aineiden kokonaiskulutus on 30 % suurempi ja kivitie+läjitys-vaihtoehtojen noin 100 % suurempi kuin tuhkateiden. Kivitie1+läjitys-vaihtoehdossa luonnonraaka-aineiden kulutus on noin kolminkertainen tuhkateihin verrattuna ja kivitie2+läjitys-vaihtoehdossa luonnon raaka-aineiden kulutus on noin 7 kertainen koeteihin verrattuna. Täyteaine- ja sementtistabiloinnissa oletettiin, että stabiloitava savi on jo olemassa stabilointipaikassa eikä sitä laskettu raaka-aineeksi.

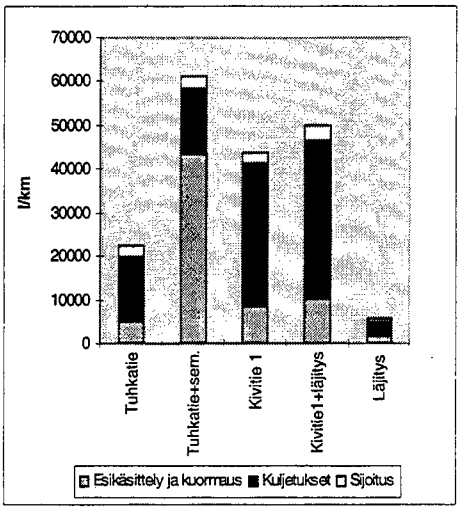
6.2 ENERGIAN- JA POLTTOAINEEN KULUTUS

Energian kulutuksella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa kokonaisenergian kulutusta, joka sisältää sekä sähköllä että polttoaineella tuotetun energian. Oletetaan, että kaikki työkoneet ja kuljetusvälineet toimivat dieselöljyllä. Toisin sanoen louhintaräjäytystä lukuun ottamatta louhinta-, murskaus-, kuormaus-, kuljetus- ja sijoitusvaiheissa kulunut energia on kokonaan diesel-polttoaineella tuotettua energiaa. Ainoastaan voimalaitoksella sivutuotteiden käsittelyyn käytettävät laitteet toimivat (voimalaitoksen omalla) sähköllä.

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty tuhkatien ja sen vertailuvaihtoehtojen energian- ja polttoaineen kulutus työvaiheittain.



Kuva 3. Tuhkatien ja vertailuvaihtoehtojen energian kulutus.



Kuva 4. Tuhkatien ja vertailuvaihtoehtojen polttoaineen kulutus.

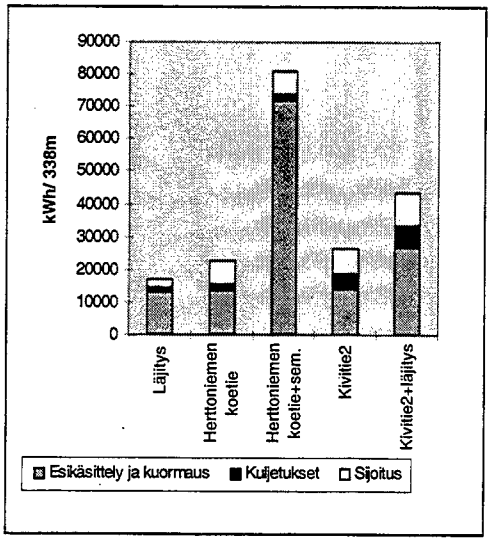
Kokonaisenergiamäärästä yli puolet kuluu esikäsittely- ja kuormausvaiheessa. Kuljetusten osuus energian kulutuksesta on 10 - 30 % ja sijoituksen 10 - 20 %. Sementtiä sisältävän tuhkatien energian kulutus on 4,5-kertainen tuhkatiehen verrattuna. Tuhkatien energian kulutus on noin 40 % pienempi kuin kivitie1+läjitysvaihtoehdon.

Polttoaineen kulutuksesta on esikäsittelyn ja kuormauksen osuus noin 20 %, kuljetusten 50 - 80 % ja sijoituksen on 4 - 13 %. Sementtiä sisältävällä tuhkatiellä esikäsittelyn ja kuormauksen osuus on 70 %. Tuhkatien polttoaineen kulutus on 55 % pienempi kuin kivitie1+läjitys-vaihtoehdon.

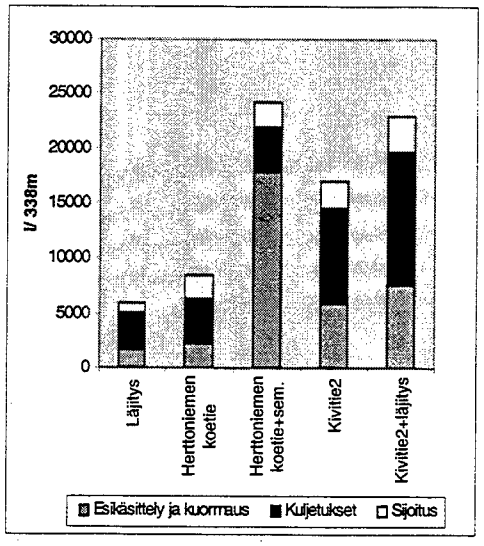
Energian kulutus kasvaa suhteessa eri vaihtoehdoissa käytettyjen raaka-aineiden määrään. Polttoaineen kulutus ei kasva samalla tavalla, vaan siihen vaikuttaa eniten käytettyjen luonnonkiviaineiden määrä. Etenkin soran ja hiekan käyttö kasvattavat polttoaineen kulutusta pitkien kuljetusmatkojen vuoksi.

Sementin käyttö lisäaineena kantavan kerroksen alaosassa kasvattaa merkittävästi energian kulutusta. Tässä tapauksessa viiden prosentin sementin lisäys nosti energian kulutuksen 4,5-kertaiseksi. Sementin aiheuttama energian kulutuksen kasvu johtuu sementin valmistuksen kuluttamasta suuresta energiamäärästä. Energiankulutus sementin valmistuksessa on 5,35 MJ/kg sementtiä, josta fossiilisen polttoaineen osuus on 4,9 MJ/kg ja sähkön 0,45 MJ/kg (Häkkinen ja Mäkelä 1996). Polttoaineen kulutus on muunnettu litroiksi olettaen, että kaikki käytetty polttoaine on ollut dieselöljyä ja että käytettyjen koneiden ominaiskulutus on 0,25 kg/kWh.

Louhintaräjäytyksessä räjähdysaineena käytettiin ANOa eli ammoniumnitraattia. Sitä kului kivitiessä 1 ja tuhkateissä 590 kg/km ja kulunut energiamäärä oli 650 kWh/km. Herttoniemen koeteissä ja kivitiessä 2 ANOa kului 120 kg/338m ja kulunut energiamäärä oli 132 kWh/338 m.



Kuva 5. Herttoniemen koetien ja sen vertailuvaihtoehtojen energian kulutus.

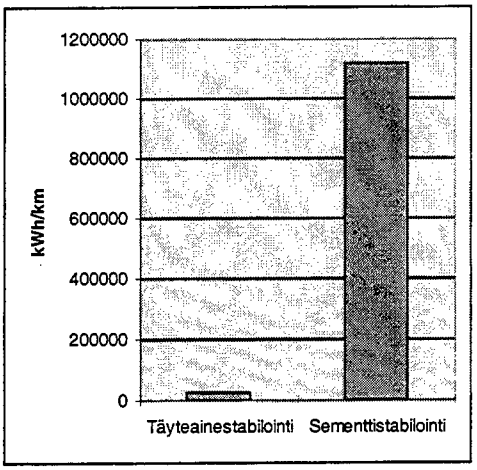


Kuva 6. Herttoniemen koetien ja sen vertailuvaihtoehtojen polttoaineen kulutus.

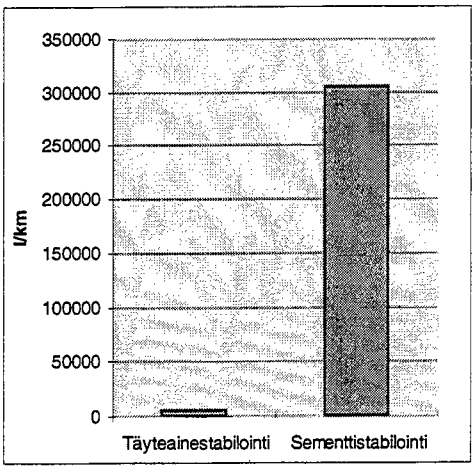
Kuvissa 5 ja 6 on esitetty Herttoniemen koetien ja sen vertailuvaihtoehtojen energian- ja polttoaineen kulutukset. Nähdään, että kokonaisenergiamäärästä yli puolet kuluu esikäsittely- ja kuormausvaiheessa. Kuljetusten osuus energian kulutuksesta on 8 - 18 % ja sijoituksen 24 - 31 %. Sementin käyttö kantavan kerroksen alaosassa nostaa energian kulutuksen 1,5-kertaiseksi. Herttoniemen koetien energian kulutus on noin 50 % pienempi kuin kivitie2+läjitys-vaihtoehdon.

Polttoaineen kulutuksesta esikäsittelyn ja kuormauksen osuus on noin 30 %, kuljetuksen noin 50 % ja sijoituksen noin 20 %. Sementtiä sisältävällä koetiellä esikäsittelyn ja kuormauksen osuus on 74 %. Herttoniemen koetien polttoaineen kulutus on noin 40 % kivitie2+läjitysvaihtoehdon kulutuksesta.

Kuvista 7 ja 8 ilmenee energian- ja polttoaineen kulutus saven stabiloinnissa. Nähdään, että sementtistabiloinnin energian kulutus on 40-kertainen ja polttoaineen kulutus 46-kertainen täyteainestabilointiin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että sementin valmistuksen osuus stabiloinnin kokonaistyömäärästä on niin merkittävä.



Kuva 7. Energian kulutus saven stabiloinnissa.



Kuva 8. Polttoaineen kulutus saven stabiloinnissa.

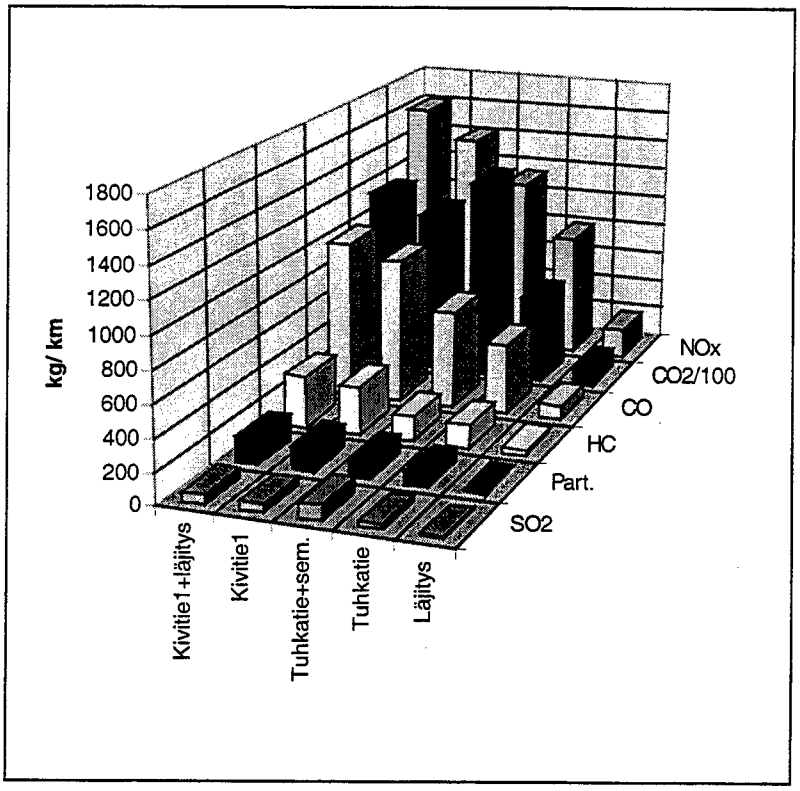
6.3 PÄÄSTÖT ILMAAN

6.3.1 Pakokaasupäästöt

Tässä tutkimuksessa on huomioitu seuraavat päästöt: typen oksidit (NO_x), hiilidioksidi (CO_2), hiilimonoksidi (CO), hiilivedyt (HC), hiukkaset (Part.) ja rikkidioksidi (SO_2). Päästöt on ilmoitettu kilogrammoina toiminnallista yksikköä kohden. Taulukossa 8 ja kuvissa 9, 10 ja 11 on esitetty eri vaihtoehdoista aiheutuvat emissiot ilmaan. Päästöt eriteltynä tien rakennekerroksittain on esitetty liitteessä B ja päästöt eriteltynä työvaiheittain on esitetty liitteessä C.

Taulukko 8. Päästöt ilmaan (kg/ toiminnallinen yksikkö) eri vaihtoehdoissa.

Päästöt	HC	CO	NO_x	Part.	SO_2	CO_2
Tuhkatie (kg/km)	145	435	789	78	33	54980
Tuhkatie + sem.(kg/km)	158	617	1140	116	94	129900
Kivitie 1+ läjitys (kg/km)	331	1000	1608	164	60	116952
Kivitie 1 (kg/km)	303	916	1422	145	53	105012
Läjitys (kg)	28	84	186	19	7	11940
Herttoniemen koetie (kg/338m)	43	126	291	28	14	18472
Herttoniemen koetie + sem. (kg/338m)	48	201	436	44	38	48928
Kivitie 2 + läjitys (kg/338m)	125	379	724	71	33	48518
Kivitie 2 (kg/338m)	97	296	538	52	25	36578
Täyteainestabilointi (kg)	42	125	349	32	19	18710
Sementtistabilointi (kg)	113	1457	2900	305	479	588800



Kuva 9. Tuhkatien ja sen vertailuvaihtoehtojen päästöt ilmaan.

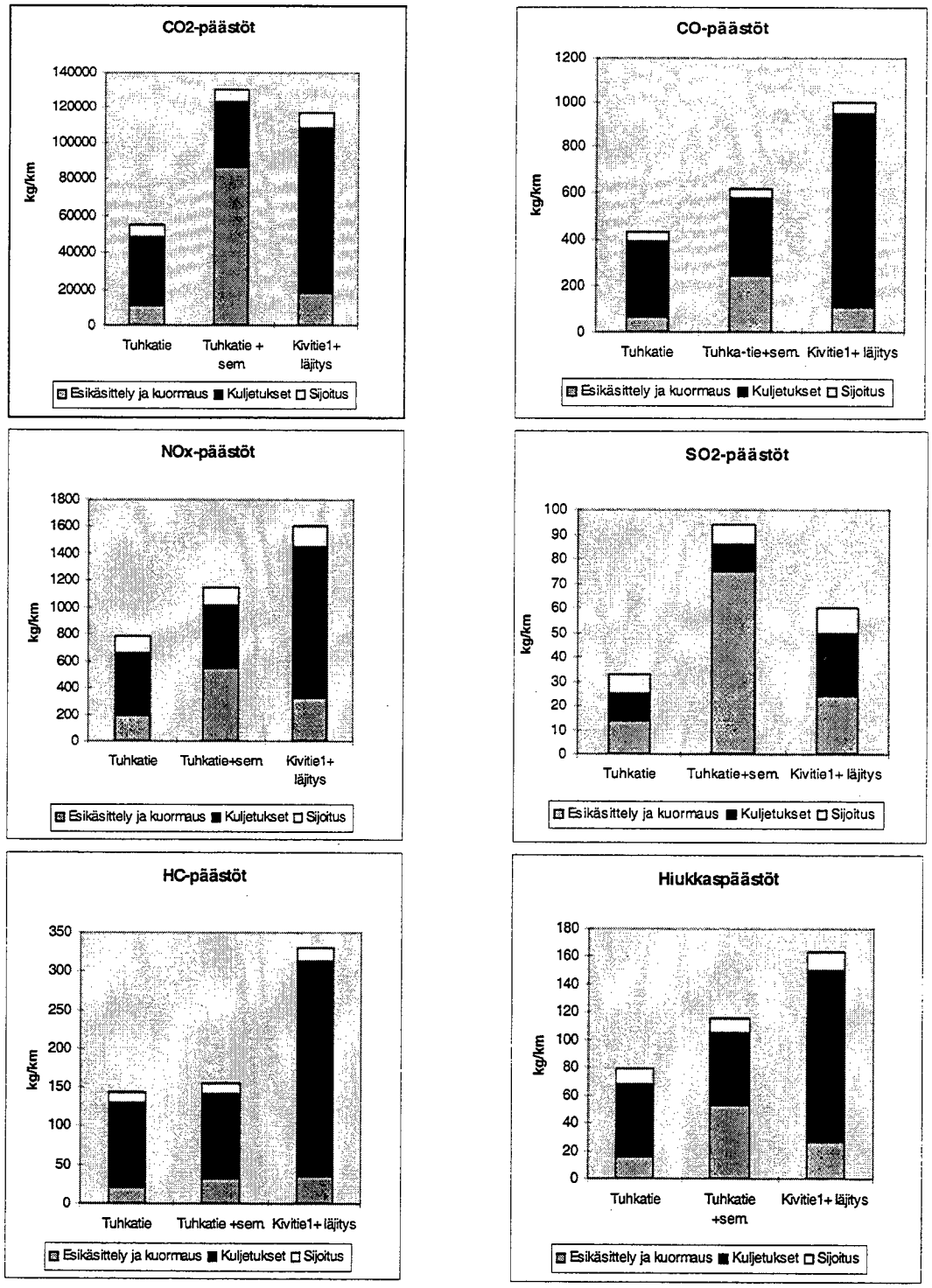
Kuvasta 9 nähdään tuhkatien ja sen vertailuvaihtoehtojen päästöt. Nähdään, että suurimmat päästöt aiheutuvat kivitie1+läjitys-vaihtoehdosta. Tuhkatien päästöt ovat noin puolet (43 - 55 %) kivitie1+läjitys-vaihtoehdon päästöistä jokaisessa päästölajissa. Kivitien päästöt ovat yksinäänkin lähes kaksi kertaa suuremmat kuin tuhkatien päästöt, sillä läjityksestä aiheutuvat päästöt ovat vain 9 - 13 % kivitien päästöistä.

Kuvasta 9 ilmenee myös, miten sementin käyttö lisäaineena kantavan kerroksen alaosassa vaikuttaa päästöihin. Tässä tapauksessa viiden prosentin sementin lisäys

nosti HC-päästöjä 8 %, CO-päästöjä 42 %, NO_x-päästöjä 44 %, hiukkaspäästöjä 49 %, SO_2-päästöjä 185 % ja CO_2-päästöjä 136 %. Hiilidioksidi- ja rikkidioksidipäästöt nousivat suhteessa eniten.

Kuvassa 10 on esitetty tuhkatien ja sen vertailuvaihtoehtojen päästöt työvaiheittain. Nähdään, että kuljetukset aiheuttavat suurimman osan päästöistä. Seuraavaksi eniten päästöjä aiheutuu esikäsittely- ja valmistusvaiheesta ja vähiten päästöjä synnyttää tienrakennus. Rikkidioksidipäästöt ovat tästä poikkeus, sillä suurin rikkidioksidipäästöjä aiheuttava työvaihe on esikäsittely ja kuormaus.

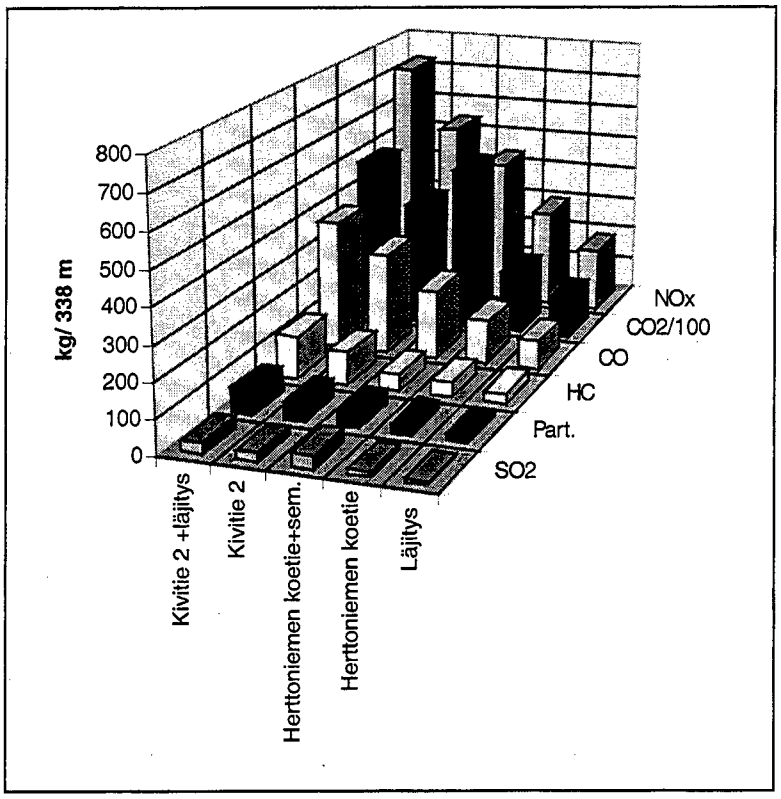
Sementin käyttö lisää päästöjä, etenkin hiilidioksidi- ja rikkidioksidipäästöjä, huomattavasti. Nämä lisäpäästöt syntyvät lähinnä sementin valmistuksesta. Tämä nähdään kyseisten päästöjen kohdalla sementtiä sisältävässä tiessä esikäsittely- ja kuormausvaiheen suurena prosenttiosuutena.



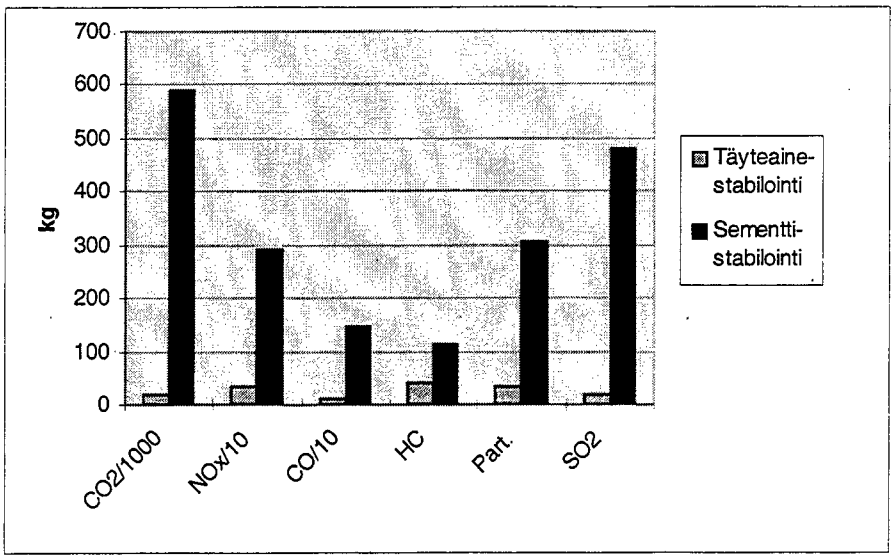
Kuva 10. Tuhkatien ja sen vertailuvaihtoehtojen päästöt työvaiheittain.

Kuljetusten merkitys korostuu eniten hiilivety- ja hiilimonoksidipäästöjen kohdalla. Tuhkateissä A ja B kuljetusten osuus HC- ja CO-päästöistä oli 76 % ja kivitie1+läjitys-vaihtoehdossa 84 %. Kivitie1+läjitys-vaihtoehdossa kuljetusten

osuus päästöistä oli jokaisessa päästölajissa erittäin suuri, mikä johtuu suurimmaksi osaksi soran ja hiekan pitkistä kuljetusmatkoista.



Kuva 11. Herttoniemen koetien ja sen vertailuvaihtoehtojen päästöt ilmaan.



Kuva 12. Päästöt saven stabiloinnissa.

Kuvassa 11 on esitetty Herttoniemen koetien ja sen vertailuvaihtoehtojen päästöt. Nähdään, että ne vastaavat melko hyvin tuhkatien ja sen vertailuvaihtoehtojen

päästöjä. Herttoniemen koetien päästöt ovat 33 - 42 % kivitie2+läjityksen päästöistä. Sementin lisäyksen vaikutukset olivat myös saman suuntaiset kuin tuhkatiessä.

Kuvasta 12 ilmenee, että sementtistabiloinnista aiheutuvat päästöt ovat huomattavasti suuremmat kuin täyteainestabiloinnin päästöt. Sementtistabiloinnissa HC-päästöt ovat 3-kertaiset, CO-päästöt 12-kertaiset, NO_x-päästöt 8-kertaiset, hiukkaspäästöt 10-kertaiset, SO_2-päästöt 25-kertaiset ja CO_2-päästöt 31-kertaiset täyteainestabilointiin nähden johtuen jälleen sementin valmistuksen aiheuttamista päästöistä.

6.3.2 Pölypäästöt

Pölyä syntyy kaikissa kiviainesten käsittely- ja jalostusvaiheissa. Kallionlouhinnan yhteydessä aiheuttavat pölyä ilmaan pääasiassa poraus, räjäytys ja louheen kuormaus. Poraus on merkityksellinen pölylähde, sillä siinä pölyä syntyy runsaasti ja varsin jatkuvasti. Räjäytyksessä ilmaan nousevaa pölyä ei ole tutkittu. Sen voidaan arvioida olevan porauksessa irronnutta ainesta, jonka paineaalto nostaa ilmaan. Kuormauksessa työkone irrottaa kulkiessaan pölyä maasta ja käsiteltävästä aineksesta. Lisäksi kuljetusajoneuvot irrottavat maasta pölyä. Kuljetusten pölyämiseen vaikuttavat mm. maan kuivuus ja ajonopeus. Kiviainesten purkaminen autoista kasoihin tai rakenteisiin aiheuttavat myös pölyämistä. Asfaltista irtoaa pölyä tien kulumisen seurauksena ja hiekoitushiekka pölyää. Lisäksi itse murskauslaitoksista aiheutuu suuria pölypäästöjä (Tielaitos 1995).

Lentotuhka ja rikinpoistotuote ovat kuivana erittäin pölyäviä. Niiden kuormauksesta, kuljetuksista, varastoinnista ja purkamisesta kasoihin tai rakenteisiin voi siten aiheutua pölyhaittoja. Pölypäästöjä voidaan estää varastoimalla aineet siiloissa, kastelemalla massa jo ennen kuormaamista autoihin ja tiivistämällä rakenteet mahdollisimman nopeasti.

Pölyn leviäminen riippuu hiukkaskoosta, päästökorkeudesta sekä sää- ja maastoolosuhteista. Kiviainesten käsittelyssä päästökorkeudet ovat yleensä 0 - 3 metriä ja pöly on usein hyvin epähomogeenista. Päästöjä voidaan vähentää kastelemalla kiviaineksia ennen käsittelyä ja erilaisilla pölynerottimilla, suojauksilla ja koteloinneilla (Matilainen 1986).

Käytännössä voi kokonaispölypäästöä enemmän merkitystä olla pienhiukkasten päästöllä. Ilmaan päässeet pienikokoiset hiukkaset pysyvät ilmassa hyvin kauan ja kulkeutuvat ilmavirtojen kantamina. Niiden leviäminen noudattaa savukaasun liikettä. Näitä hiukkasia kutsutaan leijuviksi ja niiden pitoisuutta ilmassa leijumaksi (mg tai $\mu g/m^3$). Pienhiukkaset ovat myös terveydelle haitallisia. Erityisen ongelmallinen on keuhkoihin pääsyn vuoksi halkaisijaltaan alle 5 µm:n kvartsipitoinen pöly (Matilainen 1986). Lentotuhka sisältää alle 2,5 µm:n hiukkasia noin 5 % ja alle 10 µm:n hiukkasia 10 - 20 % (Sloss 1996).

Isot hiukkaset putoavat maan vetovoiman vaikutuksesta. Näitä hiukkasia nimitetään laskeutuviksi. Laskeuma on tiettynä aikana tunnetulle pinta-alalle kertynyt

ainesmäärä (g/m^2, kk). Pölypäästöt ilmoitetaan useimmiten leijumana tietyn etäisyyden päässä lähteestä. Pölyleijuman enimmäissuositus on Tielaitoksen ohjearvojen mukaan 0,4 mg/m^3 kahdessa tunnissa. Pölypäästöä tarkastellaan yleensä lähimmän häiriintyvän kohteen kannalta (Matilainen 1986, Tielaitos 1995).

Tässä tutkimuksessa leijumien tarkastelu ei tullut kysymykseen, koska leijumaan vaikuttavat niin monet epävarmuudet, eikä leijumamittauksia ole tehty kaikille työvaiheille. Myöskään lähin häiriintyvä kohde ei ollut tiedossa. Tielaitoksen tutkimuksessa kivenmurskaamojen pölypäästöistä todettiin, ettei pöly muodostunut ongelmaksi lähimpien häiriintyvien kohteiden kannalta yhdelläkään mukana olleella kivenmurskaamolla (Tielaitos 1995).

Pölypäästöjen arvioiminen kussakin työvaiheessa osoittautui vaikeaksi. Hajanaisia pölypäästötietoja löytyi eri lähteistä, mutta useimmissa lähteissä sanottiin, että tietojen luotettavuus oli huono. Lentotuhkan pölyämistä eri vaiheissa ei ole juurikaan tutkittu. Joitakin laskeumatietoja on olemassa, mutta niiden arvioiminen tässä tutkimuksessa osoittautui liian vaikeaksi. Lentotuhkan kuormausvaiheen (lentotuhka pudotetaan siilosta suoraan kuorma-auton lavalle) pölyämisestä löytyi eräs tutkimus (Muleski *et al.* 1986). Saadut pölypäästötiedot työvaiheittain ilmenevät taulukosta 9. Taulukossa on esitetty myös ne pölyävät työvaiheet, joiden pölyämisestä ei löytynyt tietoja.

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu erikseen työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöjä ja muita pölypäästöjä. Tämä johtuu saatavien tietojen erilaisesta tarkkuustasosta. Toisin sanoen tässä luvussa tarkasteltavat pölypäästöt eivät sisällä työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen ja energiantuotannon hiukkaspäästöjä.

Taulukko 9. Pölypäästöt (Himanen et al. 1989, Muleski et al. 1986, EPA 1988).

Työvaihe	Pölypäästö	Hiukkaskoko
Louhinta/poraus	0,4 g/t kalliota	<30 µm
	0,04 g/t kalliota	<10 µm
Louhinta/räjäytys	ei tietoa	
Soran ja hiekan otto	ei tietoa	
Kivenmurskaus	1,21 kg/t	<30 µm
Kiviainesten varastointi siilossa tai kasassa	ei tietoa	
Kuormaus kaivinkoneella	29 g/t	<30 µm
Kiviainesten kuljetukset	36,06 g/km (yleisillä teillä)	2-40 µm
kuorma-autoilla	8,6 g/km (kaduilla)	2-40 µm
Kiviaineskuorman purku	0,17 g/t	<30 µm
Kiviainesten siirto hihnakuljettimella	0,17 g/t	<30 µm
Lentotuhkaseosten varastointi siilossa tai kasassa	ei tietoa	
Lentotuhkaseosten lastaaminen autoon	2 g/t	<30 µm
Lentotuhkaseosten kuljetukset	ei tietoa	
Tienrakennus normaaleilla kiviaineksilla	ei tietoa	
Tienrakennus lentotuhkalla	ei tietoa	

Em. päästötietojen perusteella nähdään, että työvaiheista suurimmat pölypäästöjen aiheuttajat ovat kivenmurskaus, kuljetukset ja kuormaus. Taulukossa 10 on esi-

tetty tärkeimmät pölypäästöt eri vaihtoehdoissa (ei sisällä liikenteen ja energiantuotannon hiukkaspäästöjä). Muut tiedossa olevat pölypäästöt olivat melko merkityksettömiä, eikä niitä ole esitetty tarkemmin tässä tutkimuksessa.

Taulukko 10. Tärkeimmät pölypäästöt eri vaihtoehdoissa.

	Tuhkatie kg/km	Kivitie1+läjitys kg/km	Herttoniemen koetie kg/338 m	Kivitie2+läjitys kg/338 m
Murskaus	4813	4813	980	980
Kuormaus	500	1320	134	810
Kuljetus	1200	3080	162	510
Yhteensä	6513	9213	1276	2300

Nähdään, että kuormauksen ja kuljetusten pölypäästöt olivat selvästi suurempia kivitie+läjitys-vaihtoehdoissa kuin tuhkaa sisältävissä teissä.

Edellä esitettyjä tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että tulokset on laskettu pelkästään saatavilla olleiden pölypäästötietojen avulla. Monta tärkeää pölyä tuottavaa vaihetta on jäänyt tarkastelusta pois. Esimerkiksi lentotuhkan pölyämistä eri vaiheissa ei ole juurikaan pystytty tässä tutkimuksessa ottamaan huomioon.

6.4 VAIKUTUKSET POHJAVETEEN

6.4.1 Lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta maaperään liukenevat aineet

Jätteistä aiheutuvien maaperään kohdistuvien haittojen arvioinnissa tulee selvittää jätteen sisältämät vesiliukoiset aineet, jotka voivat kulkea valumaveden mukana sijoituspaikan ympäristöön ja sieltä pohjaveteen. Jätteiden vaikutus suotoveteen ilmenee yleensä vasta pitkän ajan kuluttua jätteen sijoittamisesta. Jätteistä liukenevien aineiden määrä riippuu mm. jätteen laadusta, huuhtovan veden määrästä ja sijoitustavasta. Sijoitustavalla tarkoitetaan lähinnä tiivistystä ja peittämistä. Peittäminen esim. asfaltilla taas vähentää huuhtovan veden määrää. Lisäksi jätteiden liukoisuus saattaa pienenentyä lujittumisen vaikutuksesta (esim. putsolaanireaktioiden ansiosta) valmiissa rakenteessa (Ranta *et al.* 1987).

Jätteistä liukenevien aineiden määriä ei voida arvioida tarpeeksi tarkasti pelkästään koostumustietojen perusteella. Metallien liukenevuus ja samalla haitallisuus ympäristölle riippuu siitä, minkälaisena yhdisteenä metalli esiintyy. Märkäkuivamenetelmän rikinpoistotuotteesta ja lentotuhkasta liukenee lähinnä sulfaatteja, kalsiumia, klorideja, natriumia ja kaliumia sekä typpi-yhdisteitä. Lentotuhka sisältää myös aina jonkin verran raskasmetalleja. Rikinpoistojätteen raskasmetallipitoisuuteen vaikuttaa lähinnä sen sisältämä lentotuhkamäärä. Raskasmetalleista eniten liukenee molybdeeniä, kromia ja vanadiinia (Ranta *et al.* 1987).

Tässä tutkimuksessa käytettiin tanskalaisen Hjelmarin *et al.* (1991) tekemiä kolonni-liukoisuustestejä jäteseoksista liukenevien haitallisten aineiden määrän arvi-

ointiin. Testeissä oli tutkittu märkä-kuivamenetelmän rikinpoistotuotteen ja lentotuhkan liukoisuutta (teko)sadeveteen eri L/S-suhteilla. L/S-suhde laskettiin kullekin sijoitusvaihtoehdolle seuraavalla kaavalla:

$$L/S = t \bullet l \bullet (1000\ l/m^3) / (d \bullet h), \text{ missä} \qquad (3)$$

t = tarkasteltava aikaväli ensimmäisen suotoveden ilmaantumisesta lähtien [v]
l = suotautumisnopeus [mm/v]
d = jätteen tiheys [kg/m^3]
h = jätekerroksen paksuus [m]

Suotautumisnopeuden arvioinnissa otettiin huomioon vuosittainen sademäärä ja haihdunta ja mahdollisen päällysmateriaalin vedenläpäisevyys. Lasketut L/S-suhteet ilmenevät seuraavasta taulukosta (11).

Taulukko 11. Eri sijoitusvaihtoehtojen L/S-suhteet.

Sijoitusvaihtoehto	t v	l mm/v	d kg/m^3	h m	L/S l/kg
Tuhkatie	50	60	1400	0,9	2,38
Herttoniemen koetie	50	60	1400	4,35	0,49
Läjitys	50	180	1200	10	0,75
Stabilointi	50	180	1200	1	7,5

Käyttämällä Hjelmarin *et al.* (1991) kolonnitestien tuloksia laskettiin eri sijoitusvaihtoehtojen L/S-suhteita vastaavat liukoisuudet (mg/kg jätettä) eri aineille. Kun tiedettiin kuhunkin kohteeseen sijoitetut jätemäärät, saatiin lasketuksi liukenevien aineiden määrät toiminnallista yksikköä kohden. Sementin vaikutukset on jätetty tässä ottamatta huomioon, koska sementin liukoisuudesta ei ollut tietoa ja se oletettiin pieneksi.

Taulukoista 12 ja 13 nähdään lasketut tulokset. Taulukossa 12 on esitetty LT/RPT-seoksesta eri sijoituspaikoissa liukenevien aineiden määrät massan painoa kohti ja taulukossa 13 on ilmoitettu liukenevien aineiden määrät toiminnallista yksikköä kohti.

Taulukko 12. Lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta (70/30) sisältävästä massasta liukenevien aineiden määrä (mg/kg) ensimmäisten 50 vuoden aikana.

Sijoituskohde	Tiet ABC mg/kg	Läjitys mg/kg	Täyteainestabilointi mg/kg	Koetiet mg/kg
sulfaatti	1370	959	1670	872
fluoridi	2,1	0,97	3,2	0,75
kloridi	120	108	120	106
nitraattityppi	200	130	230	110
ammoniumtyppi	0,83	0,44	1,07	0,33
fosfaatti	0,18	0,03	0,46	0,01
boori	<2,2	<0,97	<2,5	<0,69
natrium	1570	710	1880	580
kalium	403	154	495	105
kalsium	680	490	1280	390
magnesium	70	62	80	58
arseeni	<0,009	<0,003	<0,02	<0,002
barium	10	0,55	20	0,16
kadmium	<,00006	<0,00003	<0,0003	<0,00003
kromi	<1,1	<0,94	<1,4	<0,86
kupari	<0,004	<0,003	<0,006	<0,002
elohopea	<0,0003	<0,0001	<0,003	<0,00005
molybdeeni	4,5	2,1	10,3	1,7
nikkeli	<0,01	<0,001	<0,02	<0,001
lyijy	<0,001	<0,0004	<0,004	<0,0002
seleeni	0,06	0,06	0,10	0,05
vanadiini	0,52	0,04	1,49	0,02
sinkki	<0,02	<0,01	<0,07	<0,01

Taulukko 13. Lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta (70/30) sisältävästä massasta liukenevien aineiden määrä (kg/toiminnallinen yksikkö) ensimmäisten 50 vuoden aikana.

Sijoituskohde	Tiet ABC kg/km	Läjitys kg/yksikkö	Täyteainestabilointi kg/yksikkö	Koetiet kg/ 338m
sulfaatti	17300	12100	21000	11800
fluoridi	26,1	12,2	40,6	10,1
kloridi	1510	1370	1510	1440
nitraattityppi	2520	1640	2900	1490
ammoniumtyppi	10,5	5,5	13,5	4,5
fosfaatti	2,22	0,35	5,84	0,19
boori	<28,2	<12,2	<31,3	<9,4
natrium	19780	8950	23690	7860
kalium	5080	1940	6240	1420
kalsium	8570	6170	16130	5280
magnesium	882	780	1010	780
arseeni	<0,11	<0,03	<0,26	<0,03
barium	126	6,88	252	2,2
kadmium	<0,0008	<0,0004	<0,0038	<0,0003
kromi	<14,3	<11,9	<17,4	<11,7
kupari	<0,049	<0,035	<0,079	<0,033
elohopea	<0,004	<0,001	<0,034	<0,001
molybdeeni	56,6	26,0	129,8	23
nikkeli	<0,131	<0,017	<0,192	<0,014
lyijy	<0,015	<0,005	<0,045	<0,003
seleeni	0,819	0,770	1,21	0,67
vanadiini	6,57	0,46	18,8	0,26
sinkki	<0,305	<0,099	<0,912	<0,072

Liukoisuus suurenee L/S-suhteen kasvaessa. Suurimmat liukoisuudet olivat sulfaatilla, natriumilla, kalsiumilla, kaliumilla, nitraattitypellä ja kloridilla. Raskasmetalleista eniten liukeni bariumia, molybdeeniä, kromia ja vanadiinia.

Liuenneet aineet eivät kuitenkaan kaikki siirry suoraan pohjaveteen, vaan osa niistä sitoutuu maannoskerrokseen erilaisten kemiallisten ja biologisten reaktioiden vaikutuksesta. Myös lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen lujittuminen putsolaanireaktioiden seurauksena vähentää eri aineiden liukenemista. Toisin sanoen lasketut liukenevien aineiden määrät kuvaavat pahinta mahdollista tilannetta.

6.4.2 Veden laadun muutokset soranottoalueilla

Soran ja hiekan otolla on vaikutuksia pohjaveden laatuun, määrään ja pinnankorkeuteen. Normaalisti kun sade- ja sulamisvedet imeytyvät maaperään ja kulkeutuvat siinä vajovetenä pohjavedeksi, vaikuttavat kasvillisuus ja maaperän pintakerrokset voimakkaasti siihen, minkälaiseksi muodostuu vajo- ja pohjaveden koostumus. Maannoskerros vähentää monien biologisten ja kemiallisten prosessien seurauksena vajoveden happamuutta ja samalla vajoveteen liukenee maaperästä aineita. Veden laatu tasaantuu ja muuttuu pohjaveden kaltaiseksi. Soranottoalueilla vajovesi on hapanta, mikä lisää esim. suolojen, raskasmetallien ja orgaanisen aineksen liukenemista maaperästä pohjaveteen. Tämän seurauksena pohjaveden tasalaatuisuus vähenee ja happamoitumisriski kasvaa (Hatva *et al.* 1993).

Kun puut, kasvillisuus ja mannoskerros poistetaan soranottoalueelta, haihdunta sieltä pienenee ja pohjaveden muodostuminen lisääntyy. Pohjaveden määrän lisääntyminen taas kasvattaa pohjaveden pinnankorkeuden vaihteluväliä. Suurimmat muutokset soranottoalueen pohjavesissä tapahtuvat silloin, kun suojakerros on niin ohut, että pohjaveden pinta nousee ajoittain maanpinnan tasolle tai sen yläpuolelle. Lisäksi pohjaveden lämpötilan vaihtelut kasvavat, mikä kesällä saattaa tuntua makuhaittana. Kun soraa otetaan pohjaveden pinnan alapuolelta, syntyneen lammikon veden laatu alkaa vaihdella kuten pintavesissä (Hatva *et al.* 1993).

Ne tievaihtoehdot, joissa käytettiin soraa tai hiekkaa, aiheuttivat mahdollisesti muutoksia soranottoalueen pohjavesissä. Eri vaihtoehtojen vaikutuksia pohjaveden laatuun ja määrään ei tässä tutkimuksessa pystytty kuitenkaan tarkemmin arvioimaan tai vertailemaan.

6.4.3 Pohjaveden likaantuminen

Luonnontilaisen pintakerroksen poistaminen soranoton yhteydessä lisää merkittävästi pohjaveden likaantumisriskiä. Maannoskerrokseen normaalisti pidättyvät lika-aineet ja mikrobit pääsevät helpommin kulkeutumaan pohjaveteen. Pohjaveden likaantumisriskiä aiheuttavat lisäksi esim. työkoneiden, polttoainesäiliöiden ja murskauslaitosten öljy- ja kemikaalivuodot, tiesuolan varastoista liukeneva suola sekä sorakuoppien täyttö jätemailla ja ylijäämämassoilla (Hatva *et al.* 1993).

Ne tievaihtoehdot, joissa käytettiin soraa tai hiekkaa, aiheuttivat pohjavesien likaantumisriskin. Myös muista työvaiheista saattoi aiheutua vesien likaantumista.

Eri vaihtoehtojen vaikutuksia pohjaveden likaantumiseen ei pystytty tässä tutkimuksessa kuitenkaan tarkemmin arvioimaan.

6.5 MELU

Melupäästö ilmoitetaan tavallisesti äänitasona, eli A-painotettuna äänenpainetasona (L_{pA}), joka määritellään: $L_{pA}= 20 \lg(p_A/p_0)$, missä p_A on A-painotettu äänenpaine ja p_0 vertailupaine (=µ20 Pa). Äänitason yksikkö on desibeli (dBA). Lääkintöhallitus on antanut melun terveydelliset ohjearvot, jotka ilmenevät taulukosta 13 (Matilainen 1986, Tielaitos 43/1993).

Taulukko 13. A-äänitason ohjearvot ulkona.

Alueen pääasiallinen käyttötarkoitus	A-äänitaso (dB) päivällä klo 7 - 22	A-äänitaso (dB) yöllä klo 22 - 7
Asuntoalueet [1]	55	*
Yleisten rakennusten alueet [2]	55	
Virkistysalueet [3]	45	40

*Uusilla virkistysalueilla tulisi pyrkiä tasoon 45 dB

1) Loma-asuntojen pihapiirissä tulisi pyrkiä 5 - 10 dB alhaisempiin tasoihin ympäristön lepo- ja virkistysvaikutusten tehostamiseksi.
2) Ohjearvo koskee melulle herkkiä rakennuksia ja alueita, kuten sairaaloita, hoitolaitoksia, hautausmaita ja opetukseen käytettäviä rakennuksia.
3) Virkistysalueita ovat käytössä olevat retkeily-, ulkoilu-, urheilu-, uimaranta- ja leirintäalueet. Ohjearvot eivät koske alueella sen käyttötarkoitusta vastaavan toiminnan aiheuttamaa ääntä. Asunto-, teollisuus- ja liikennealueiden läheisille urheilu-, ulkoilu- ja uimaranta-alueille voidaan hyväksyä 5 dB korkeammat melutasot. Tällöin kuitenkin urheilusuoritusten keskittymisrauha ja ulkoilun virkistävä vaikutus saattavat huonontua. Yöajan (klo 7 - 22) ohjearvoa sovelletaan vain telttailu- ja leirintäalueilla.

Melu etenee lähteestä kaikkiin suuntiin ja sen etenemiseen vaikuttavat monet tekijät. Melu vaimenee edetessään mm. etäisyyden, ilman ja maanpinnan absorption sekä kasvuston ja rakenteiden vaikutuksesta. Melulähteen ympäristössä todettava melu on useimmiten yhdistelmä monien eri lähteiden meluista. Näitä lähteitä voivat olla esimerkiksi tuulen humina, sateen ropina, lintujen viserrys, tieliikenteen tai lentokoneiden äänet tai ihmisten puhe (Matilainen 1986).

Melun haitallisuuden ja tarpeellisten suojatoimien arvioimiseksi tulee jo toiminnan suunnitteluvaiheessa pystyä ennakoimaan melutaso ongelmalliseksi arvioiduissa paikoissa. Yleensä arviointi tehdään lähimmän häiriölle alttiin kohteen suhteen tai lasketaan etäisyys, jossa alitetaan edellä mainitut melun ohjearvot. Tässä tutkimuksessa ei voitu määrittää eri vaihtoehtojen kokonaismeluja, koska eri työvaiheet tapahtuvat eri paikoissa ja työkoneita käytetään eri aikaan ja eri pituisia jaksoja. Lisäksi ulkoiset olosuhteet vaikuttavat melupäästöihin kuten edellä on mainittu. Tässä tutkimuksessa työkoneiden ja -vaiheiden melut ilmoitetaan melutasona 7 metrin etäisyydellä lähteestä (Matilainen 1986, Naturvårdsverk 1983). Nämä melutasot ilmenevät taulukosta 14.

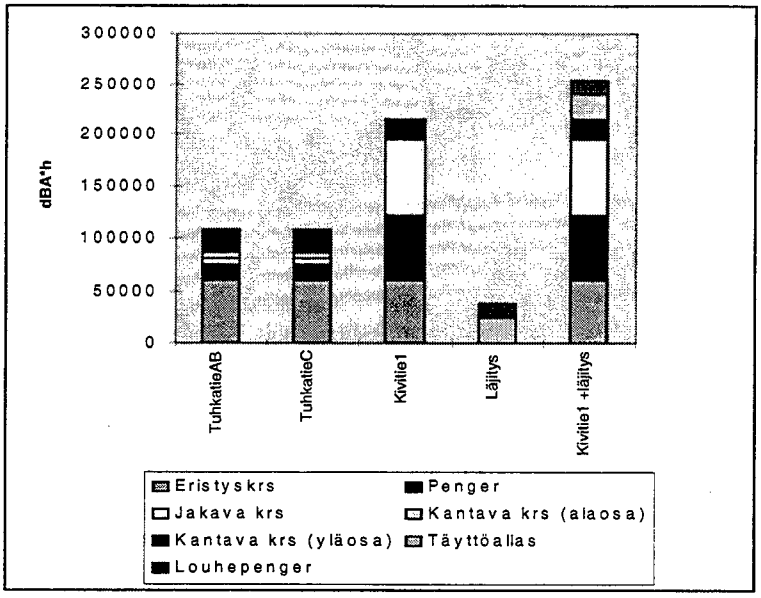
Suurin melutaso on louhintaräjäytyksellä. Se on impulssimainen ääni, joka saattaa aiheuttaa esim. rakenteellisia vaurioita tai ikkunaruutujen särkymistä. Seuraavaksi suurimmat melutasot olivat kallioporakoneella ja murskaamolla. Niiden melutaso oli 100 dB. Työkoneiden ja kuorma-autojen melutasot vaihtelivat 84 ja 92 desibelin välillä.

Taulukko 14. Työkoneiden ja -vaiheiden melutasot 7 metrin etäisyydellä lähteestä.

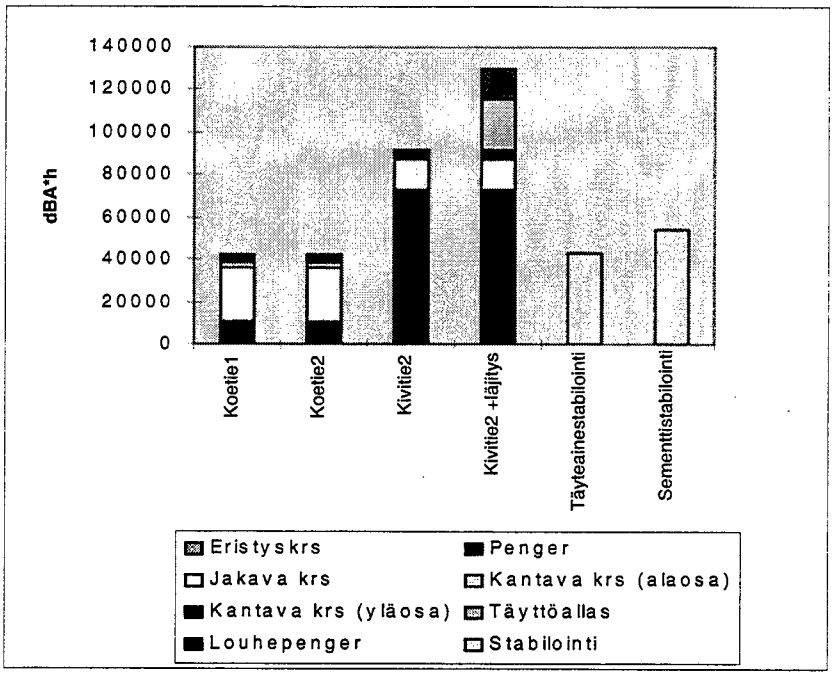
Kone	Melutaso dBA	Keskimääräinen melutaso (dBA)
Vaunuporakone	98 - 101	100
Louhintaräjäytys	125 - 136	130
Hydraulivasara	87 - 92	90
Hihnakuljetin	84	84
Murskaamo	100	100
Hydraulinen kaivinkone	82 - 100	89
Maansiirtoauto	91	91
Kuorma-auto	84	84
Puskutraktori	80 - 89	84
Tiejyrä	84 - 101	92
Tiehöylä	85 - 89	87

Voimalaitoksella tuhkan käsittelyyn käytettyjen koneiden melutasot ovat melko korkeita, yleensä 90 - 95 dB. Melutaso vaihtelee kuitenkin melko paljon laitoksen sisällä (Ollila 1994). Kyseiset melut oletettiin tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömiksi, sillä laitteet ovat voimalaitoksen sisällä, tiloissa, missä ei jatkuvasti oleskele ihmisiä.

Eri vaihtoehtojen meluja vertailtiin seuraavalla tavalla: Kunkin työvaiheen melutaso kerrottiin työajalla, jolloin saatiin nk. meluaika (dBA • h) kullekin työvaiheelle. Meluajat laskettiin yhteen rakennekerroksittain ja näitä tuloksia vertailtiin keskenään. Oletettiin, että eri työvaiheet tapahtuvat peräkkäin. Louhintaräjäytyksen melutaso jouduttiin jättämään tästä tarkastelusta pois, koska räjäytyksestä aiheutuva ääni on hyvin lyhytkestoinen. Liitteen D taulukossa ja kuvissa 13 ja 14 on esitetty saadut tulokset.



Kuva 13. Meluajat rakennekerroksittain tuhkatiessä ja sen vertailuvaihtoehdoissa.



Kuva 14. Meluajat rakennekerroksittain Herttoniemen koetiessä, sen vertailu-vaihtoehdoissa ja stabiloinneissa.

Nähdään, että kivitie1+läjitys-vaihtoehdossa meluaika on 2,5 kertaa suurempi kuin tuhkateissä. Kivitie2+läjitys-vaihtoehdossa meluaika on 3 kertaa suurempi kuin Herttoniemen koeteissä. Sementtistabiloinnissa meluaika oli 25 % suurempi kuin täyteainestabiloinnissa. Nähdään, että kiviaineksia sisältävien kerrosten meluaika oli huomattavasti suurempi kuin sivutuotteita sisältävien kerrosten.

6.6 MAAN KÄYTTÖ

Maa-aineslain mukaan maa-ainesten ottaminen on turpeen ottoa lukuun ottamatta yleensä luvanvarainen toimenpide. Lupaa ei tarvita kotitarveottoon, eikä esimerkiksi rakentamisen yhteydessä irrotettujen maa-ainesten ottoon ja hyväksikäyttöön, kun toimenpide perustuu viranomaisen antamaan lupaan tai hyväksymään suunnitelmaan. Tämä on hyvin tavanomaista esimerkiksi tienrakentamisessa. Maa-aineslain mukaan maa-aineksia ei saa ottaa niin, että siitä aiheutuu kauniin maisemakuvan turmeltumista, luonnon merkittävien kauneusarvojen tai erikoisten luonnonesiintymien tuhoutumista taikka huomattavia tai laajalle ulottuvia vahingollisia muutoksia luonnonolosuhteissa (Hatva *et al.* 1993).

Hiekan ja soran otosta aiheutuu maaperän vaurioitumista sekä maiseman ja alkuperäisen harjuluonnon muuttumista. Näillä on vaikutuksia paitsi itse maaperään, vesiin, kasvillisuuteen ja eläimiin myös alueen virkistyskäyttöön. Sen vuoksi soranottoalueiden kunnostus ja jälkihoito on erittäin tärkeää. Eliöyhteisön monimuotoisuutta mahdollisesti kohdanneita vaurioita on kuitenkin vaikea korjata. Kallion murskaus aiheuttaa muutoksia maan rakenteessa ja toimintakyvyssä, kun maa-aineksia poistetaan paikoin ja niitä läjitetään toisaalle. Lisäksi kallion murskauksesta seuraa maisemamuutoksia ja arvokkaiden kivialueiden tuhoutumista (Kylä-Setälä & Assmuth 1996).

Useimmissa elinkaariarvioissa maankäyttö on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, koska maan käytön arviointimenetelmät ovat vielä melko kehittymättömiä. Maan käytön vaikutusten arviointiin on käytetty muun muassa seuraavia menetelmiä:

- Kaikki maankäyttö lasketaan yhteen pinta-alan perusteella painottamatta. Käytön ajallista kestoa ei oteta huomioon.

- Maankäyttö lasketaan inventaarissa pinta-alan ja käyttöajan mukaan (m^2a). Jos maankäyttö on hyvin pitkäaikaista, se määritellään loppukäytöksi ja esitetään pelkästään pinta-alana. Arviointia varten käytetty maa ryhmitellään viiteen ryhmään, jotka ovat (Heijungs et al. 1992):

  - luonnon ekosysteemit
  - muuttuneet ekosysteemit
  - viljellyt ekosysteemit
  - rakennetut ekosysteemit
  - saastuneet ekosysteemit.

  Heijungs et al. (1992) ehdottavat, että maatyypin siirto kolmesta ensimmäisestä ryhmästä kahteen jälkimmäiseen lasketaan vahingoittumiseksi ja tällainen käyttö lasketaan yhteen ilman muuta painotusta.

- EPS-järjestelmässä maata ei pidetä sinänsä resurssina, vaan maankäyttöä arvioidaan sen tuotantoon ja biodiversiteettiin aiheuttamien vaikutusten mukaan.

Maan käytön seurauksia ei aina tunneta hyvin. Lisäksi vaikutukset ovat usein paikallisten tekijöiden mukaan määräytyviä. Finnvedenin (1993) mukaan olisi mm.

harkittava, arvioidaanko maan kokonaiskäyttöä, maan käyttöarvon (tai ekologisen arvon) heikkenemistä vai molempia. Toisaalta olisi myös selvitettävä, miten voidaan määritellä yhteydet muihin vaikutusryhmiin.

Tässä tutkimuksesssa arvioitiin maan käyttöä tienrakennuksen, läjitysaluesijoituksen ja stabiloinnin tarvitseman pinta-alan mukaan. Tuhkateiden ja kivitien 1 tarvitsema pinta-ala oli 10 000 m^2/km. Herttoniemen koetien ja kivitien 2 tarvitsema pinta-ala oli 2 028 m^2/338 m ja läjityksen 1 118 m^2/yksikkö. Stabiloinnissa tarvittavat pinta-alat olivat täyteainestabiloinnissa 28 250 m^2 ja sementtistabiloinnissa 17 690 m^2. Stabilointivaihtoehdoissa pinta-alojen ero johtui käytettyjen stabilointiaineiden määrän erosta. Tässä otettiin huomioon vain tien alle jäävä tai läjitykseen tai stabilointiin tarvittava pinta-ala. Todellinen maan käyttötarve on kuitenkin ainakin tienrakennuksessa suurempi, sillä tien penkereet ja suojavyöhykkeet tarvitsevat aina enemmän tilaa kuin itse tie.

Lisäksi maan käytössä tulisi ottaa huomioon soran ja hiekan otosta ja louhinnasta aiheutuva maan käyttö. Näitä tekijöitä on vaikea arvioida pinta-alan perusteella, sillä soranottopaikat ovat erilaisia ja louhittava kiviaines voi tulla hyvin erilaisista paikoista. Joskus kiviainekset louhitaan suoraan tienrakennustyömaalta ja toisinaan taas muualta. Näitä edellä mainittuja vaikutuksia ei tässä tutkimuksessa pystytty huomioimaan.

6.7 MUUT YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

6.7.1 Tienpintojen kuluminen

Tienpintojen kulumiseen vaikuttavat liikennemäärä, päällysteen koostumus, ilmasto, talvisuolaus, ajonopeudet ja liikenteen kanavoituminen samoihin raiteisiin tien kapeuden takia. Pölypäästöjen kohdalla on esitetty kuljetusten aikana asfaltoitujen teiden kulumisesta aiheutuvat pölypäästöt. Koska tienpintojen kulumiseen vaikuttavat useat eri tekijät ja monet näistä tekijöistä olivat tuntemattomia, ei tienpintojen kulumista tarkasteltu enempää tämän tutkimuksen yhteydessä.

6.7.2 Onnettomuusriskit

Maa- ja vesirakennustoiminta on perinteisesti ollut ala, jossa tapaturmia sattuu paljon. Tapaturmien määrä on kuitenkin laskenut 80- ja 90-luvuilla. Myönteisestä kehityksestä huolimatta rakennustoiminnassa on tapaturmaisen kuoleman vaara huomattavasti korkeampi kuin muilla aloilla. Maa- ja vesirakennustoiminnassa sattui tuhatta työntekijää kohden laskettuna vuosina 1982 - 86 keskimäärin 0,192 kuolemaan johtanutta tapaturmaa. Vastaavana aikana valtakunnallinen keskiarvo oli 0,045. Vaarallisia tehtäviä ovat mm. louhinta, asfaltointi, koneiden- ja laitteiden huolto, korjaus ja asennus sekä maarakennuskoneen kuljetus. Koska maarakennustoiminta on tyypillistä ulkotyötä, vaikuttavat työskentelyolosuhteisiin suuresti myös vuodenaika ja säätila. Työolosuhteita vaikeuttavat mm. liukkaus, kylmyys, veto, sade, tuulisuus ja pimeys (Reinikka 1987, Hyödynmaa & Herranen 1987).

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain kuljetusten aikana tapahtuneita onnettomuuksia, sillä muista työvaiheista ei löytynyt tarpeeksi yksityiskohtaista ja työvaiheittaista tietoa. Onnettomuusriskejä arvioitiin Tielaitoksen onnettomuustilastojen perusteella.

Henkilövahinko-onnettomuuksia tapahtui vuosina 1991 - 95 yleisillä teillä keskimäärin 3 631 kpl. Onnettomuustiheys oli taajamien ulkopuolella valta- ja kantateillä 11,0 kpl/100 km ja muilla yleisillä teillä 2,2 kpl/100 km. Taajamien sisäpuolella vastaavat arvot olivat 39 kpl/100 km ja 17,9 kpl/100 km. Onnettomuusriski (kpl/100 milj. ajoneuvokm) oli taajamien ulkopuolelle valta- ja kantateillä 9,7 ja muilla yleisillä teillä 15,6. Taajamien sisäpuolella vastaavat arvot olivat 13,1 ja 26,1. Toisin sanoen onnettomuusriski oli yleisillä teillä keskimäärin 16,1 kpl/100 milj. ajoneuvokilometriä (Tielaitoksen tilastoja 1996).

Olettamalla, että tienrakennus tehtiin kesäkaudella ja käyttämällä edellä mainittua keskimääräistä onnettomuusriskiä, saatiin laskettua todennäköisten onnettomuuksien määrä kuljetusten aikana kussakin vaihtoehdossa. Tulokset on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Todennäköisten henkilövahinko-onnettomuuksien lukumäärä kuljetusten aikana eri vaihtoehdoissa.

Vaihtoehto	Ajetut tiekilometrit km	Onnettomuuksia kpl
Tuhkatie	41 280	0,0066
Kivitie1	92 700	0,0149
Läjitys	9 020	0,0015
Kivitie1+läjitys	101 720	0,0164
Herttoniemen koetie	10 780	0,0017
Kivitie2	24 140	0,0039
Kivitie2+läjitys	33 160	0,0053
Täyteainestabilointi	6 400	0,0010
Sementtistabilointi	600	0,0001

Onnettomuuksien todennäköisyys kuljetusten aikana kasvaa ajettujen tiekilometrien suhteessa. Kivitie1+läjitys-vaihtoehdossa ajettujen tiekilometrien määrä samoin kuin onnettomuuksien todennäköisyys oli noin kaksinkertainen tuhkatiehen verrattuna. Kivitie2+läjitys-vaihtoehdossa onnettomuuksien todennäköisyys oli kolminkertainen sen vertailuvaihtoehtoihin nähden. Molemmissa stabilointivaihtoehdoissa onnettomuusriski oli hyvin pieni, koska ajetut tiekilometrit olivat vähäisiä. Täyteainestabiloinnissa onnettomuusriski oli kuitenkin 10-kertainen sementtistabilointiin nähden.

6.7.3 Vaikutukset tien käyttöominaisuuksiin ja korjaustarpeeseen

Lentotuhkamassa lujittuu hyvin. Puristuslujuuden kehitys vaihtelee kuitenkin paljon tuhkan laadusta ja olosuhteista riippuen. Tiivistetyn tuhkamassan lujittumi-

nen tapahtuu suhteellisen hitaasti, pääasiassa ensimmäisen puolen vuoden aikana. Kolmen kuukauden aikana saavutetaan 0,5 - 3,0 MPa:n puristuslujuus (Rämö 1996).

Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen vaikutuksesta tien käyttöominaisuuksiin ei löytynyt kirjallisuudesta tietoja, joten niiden vaikutukset käyttöominaisuuksiin jätettiin ottamatta huomioon tässä tutkimuksessa. Myös lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käytön vaikutukset tien korjaustarpeeseen ja sitä kautta aiheutuviin lisäkuormituksiin pitäisi ottaa huomioon ja verrata niitä vastaavan luonnon materiaaleista valmistetun tierakenteen korjaustarpeeseen. Näistä vaikutuksista ei myöskään löytynyt kirjallisuudesta tietoja, joten ne täytyi jättää huomiotta tässä tutkimuksessa.

Häkkinen ja Mäkelä (1996) ovat tehneet tien päällysteiden elinkaariarvioinnin, jossa verrattiin betoni- ja asfalttipäällysteitä. Elinkaariarviossa on tarkasteltu myös tien korjausten ja kunnossapidon aiheuttamia kuormituksia. Julkaisussa on verrattu tien päällystyksen, asfalttipinnoitteiden kunnossapidon ja korjausten sekä liikenteen aiheuttamia kuormituksia. Suurimmat kuormitukset aiheutuvat asfalttipinnoitteiden kunnossapidosta ja korjauksista. Koko asfalttipinnoitteen elinkaaren (50 vuotta) aikaisista kuormituksista kunnossapidon ja korjausten osuus oli 4 %. Liitteessä E on esitetty taulukko, josta nähdään tien päällystämisen sekä kunnossapidon ja korjausten ympäristökuormitukset. Nämä kuormitukset eivät ole verrannollisia tämän tutkimuksen tuloksiin, koska tarkasteltu tierakenne on erilainen (8,5 m leveä moottoritie, jonka kuormitustaso on korkea).

7 ELINKAAREN AIKAISTEN YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN ARVIOINTI

7.1 YMPÄRISTÖKUORMITUS- JA VAIKUTUSTIETOJEN SAATAVUUS JA LUOTETTAVUUSTASO

Ympäristökuormitustietojen saatavuus vaihteli kuormituksittain hyvin paljon. Myös tietojen luotettavuus oli eri kuormituksilla erilainen. Työkoneiden ja kuljetusten päästöt sekä energian- ja polttoaineen kulutustiedot löytyivät helposti. Työkoneiden energian kulutukset laskettiin käyttäen koneiden keskimääräisiä käyttöja nimellistehoja. Päästöt saatiin suoraan kertomalla käytetty energia päästökertoimella. Koneiden polttoaineen kulutus laskettiin käyttäen kullekin koneryhmälle annettua ominaiskulutusta. Edellä mainitut tiedot saatiin Purasen (1992) julkaisusta. Nämä kuormitustiedot ovat kullekin koneryhmälle annettuja keskimääräisiä tietoja, jotka ovat riittävän tarkkoja yleisellä tasolla. Yksittäistapauksia tarkasteltaessa nämä kuormitustiedot saattavat kuitenkin olla liian epätarkkoja.

Kuljetusten polttoaineen kulutus laskettiin käyttäen Haapasen ja Oksasen (1981) kirjassa esitettyä matemaattista mallia. Eri ajoneuvotyyppien polttoaineen kulutukseen vaikuttavat mm. ajoneuvon paino, teho ja akselien lukumäärä, tien mäki-

syys ja päällyste, ajonopeus sekä pysähdysten ja kiihdytysten määrä. Laskut tehtiin olettaen tien ja auton kunto normaaliksi, mäkisyys keskimääräiseksi ja ajo suoritetuksi maantiellä ilman pysähdyksiä. Kuljetusten energiankulutus saatiin jakamalla kuljetusmatka ajoneuvon energiatehokkuudella. Energiatehokkuudet saatiin myös Haapasen ja Oksasen (1981) kirjasta. Kuljetusten päästöt saatiin kertomalla kuljetusmatka päästökertoimella, jotka on esitetty Mäkelän *et al.* (1996) julkaisussa. Kuljetusten ympäristökuormitustiedot ovat keskimääräisiä tietoja, joiden luotettavuus on melko hyvä.

Pölypäästötietojen saatavuus oli huono sekä kiviainesten että lentotuhkan osalta. Joidenkin työvaiheiden pölyämisestä ei löytynyt tietoja ollenkaan ja niidenkin tietojen, jotka saatiin, luotettavuus oli huono. Pölypäästöjä esitettäessä erotetaan pienhiukkaset usein erikseen, sillä ne ovat terveydelle erityisen haitallisia. Ne pysyvät ilmassa kauan ja kulkeutuvat ilmavirtojen kantamina kauas lähteestä. Pölypäästöt ilmoitetaan yleensä leijumana tietyn etäisyyden päässä kohteesta. Näitä leijumatietoja oli saatavissa jonkin verran sekä kiviainesten että lentotuhkan osalta, mutta niiden käyttö tässä tutkimuksessa osoittautui vaikeaksi, sillä lähin häiriintyvä kohde ei ollut tiedossa. Lentotuhkan pölyämisestä löytyi tietoa vielä vähemmän kuin kiviainesten pölyämisestä. Ainoastaan lentotuhkan pölyämisestä lastausvaiheessa löytyi mittaustietoja. Tiedetään kuitenkin, että lentotuhka ja rikinpoistotuote ovat kuivana erittäin pölyäviä ja että ne sisältävät melko suuria määriä pienhiukkasia. Voidaan todeta, että pölypäästöjen osalta tämä tutkimus jäi vajavaiseksi, sillä tarkastelu jouduttiin tekemään vain saatavilla olleita pölypäästötietoja käyttäen.

Lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta maaperään liukenevien aineiden määriä jouduttiin arvioimaan laboratoriokoetulosten perusteella, koska liukenevien aineiden todellisia määristä ei löytynyt tutkimustuloksia. Eri vaihtoehdoissa muodostuvien suotovesien laatua arvioitiin tanskalaisen Hjelmarin *et al.* (1991) tekemien kolonni-liukoisuustestien avulla. Kolonnitesteissä simuloidaan monien vuosien suotautumistapahtumia muutamissa kuukausissa. Tuloksiin saattaa aiheutua virhettä mm. siitä, että lyhyen koeajan aikana ei ehdi tapahtua massan lujittumista putsolaanireaktioiden ansiosta, mikä pienentää todellisissa olosuhteissa aineiden liukoisuuksia. Koetulosten perusteella arvioidut liukenevien aineiden pitoisuudet ovat siten todennäköisesti todellista suurempia, eli ne kuvaavat pahinta mahdollista tilannetta.

Luonnonkiviainesten otosta aiheutuvia veden laadun muutoksia ei tässä tutkimuksessa pystytty arvioimaan tai vertailemaan. Myöskään muista työnaikaisista veden likaantumisriskeistä, kuten koneiden polttoainesäiliöiden vuodot tai tiesuolan varastoista liukeneva suola, ei löytynyt tarpeeksi tietoja. Nämä kuormitukset jouduttiin tässä tutkimuksessa jättämään huomiotta.

Työkoneiden ja -laitteiden melut ilmoitettiin keskimääräisenä melutasona 7 metrin etäisyydellä lähteestä. Kunkin konetyypin melutaso vaihtelee jonkin verran, mutta keskimäärin melukuormitusten arvot ovat luotettavia. Eri vaihtoehtojen meluja vertailtiin laskemalla nk. meluaika (desibeleinä esitetty melu kerrottiin sen kestoajalla) kullekin työvaiheelle. Eri vaihtoehdoille laskettiin kokonaismeluajat ja

näitä verrattiin keskenään. Tässä tarkastelutavassa oletettiin, että kaikki työvaiheet tapahtuvat peräkkäin, mikä ei aina todellisuudessa pidä paikkaansa. Tämän tarkastelutavan luotettavuutta on vaikea arvioida, mutta se on varmasti ainakin suuntaa-antava.

Maan käyttöä arvioitiin eri vaihtoehtojen tarvitseman pinta-alan mukaan. Otettiin huomioon vain tien alle jäävä tai läjitykseen tai stabilointiin tarvittava pinta-ala. Tämä on hyvin yksinkertaistettu tapa lähestyä asiaa, minkä takia tulokset kuvaavat huonosti maan käytön todellista merkitystä. Maan käytön arviointi on osoittautunut vaikeaksi, sillä arviointimenetelmät ovat vielä melko kehittymättömiä, eikä maan käytön seurauksia aina tunneta hyvin. Arviointia vaikeuttaa myös se, että vaikutukset ovat usein paikallisten tekijöiden mukaan määräytyviä. Lisäksi on vielä epäselvää, tulisiko arvioida maan kokonaiskäyttöä, maan käyttöarvon alenemista vai molempia (Finnveden 1993).

Maa- ja tierakennustoiminnassa onnettomuusriski on useimmissa työvaiheissa melko suuri verrattuna muihin aloihin. Tässä tutkimuksessa onnettomuusriskeistä arvioitiin kuitenkin vain kuljetusten aikaisia onnettomuuksia ja tarkastelematta jätettiin muiden työvaiheiden aikaiset onnettomuusriskit, sillä muista työvaiheista ei löytynyt tarpeeksi tietoa.

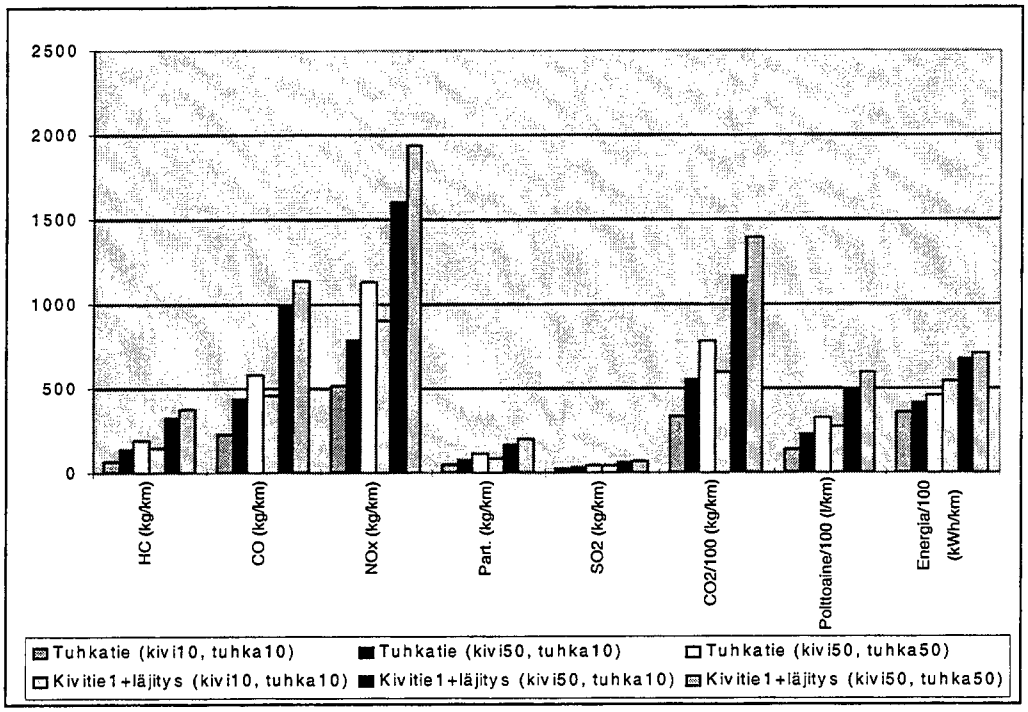
Tienpintojen kulumisen ja lentotuhkaseosten käytön vaikutukset tien käyttöominaisuuksiin ja korjaustarpeeseen jouduttiin jättämään huomiotta tässä tutkimuksessa, koska kirjallisuudesta ei löytynyt riittävästi tietoja näistä vaikutuksista.

Arvioinnista on jätetty pois myös rakenteen käytöstä poiston jälkeiset kuormitukset. Esimerkiksi haitta-aineiden liukeneminen jatkuu tarkasteluajan jälkeen.

7.2 TULOSTEN EPÄVARMUUDET

Eri ympäristövaikutuksia arvioitaessa jouduttiin tekemään niin monia oletuksia, että tulosten epävarmuudet ja vaihteluvälit tulivat melko suuriksi. Tulosten luotettavuutta parantaa kuitenkin se, että eri vertailuvaihtoehtojen tarkastelussa on tehty samoja oletuksia. On käytetty mm. samankokoisia koneita ja samoja kuljetusmatkoja. Siksi monilla oletuksilla on eri vaihtoehtojen vertailussa suurempi vaikutus tulosten absoluuttisiin arvoihin kuin vertailun lopputulokseen.

Tässä tutkimuksessa oletettiin, että luonnonkiviainekset tuodaan 50 km päästä ja kaikki muut ainekset (murskeet, louheet ja lentotuhkaseokset) tuodaan 10 km päästä. Koska kuljetusmatkoilla on huomattava vaikutus eri vaihtoehtojen energian- ja polttoaineen kulutukseen ja päästöihin, tehtiin herkkyystarkastelu kuljetusmatkan vaikutuksesta kuormituksiin. Tarkasteltiin esimerkinomaisesti, mitä vaikutuksia olisi sillä, että luonnonkiviainesten kuljetusmatka olisi vain 10 km tai, että lentotuhkaseosten kuljetusmatka olisi 50 km. Nämä vaikutukset on esitetty kuvissa 15, 16 ja 17.



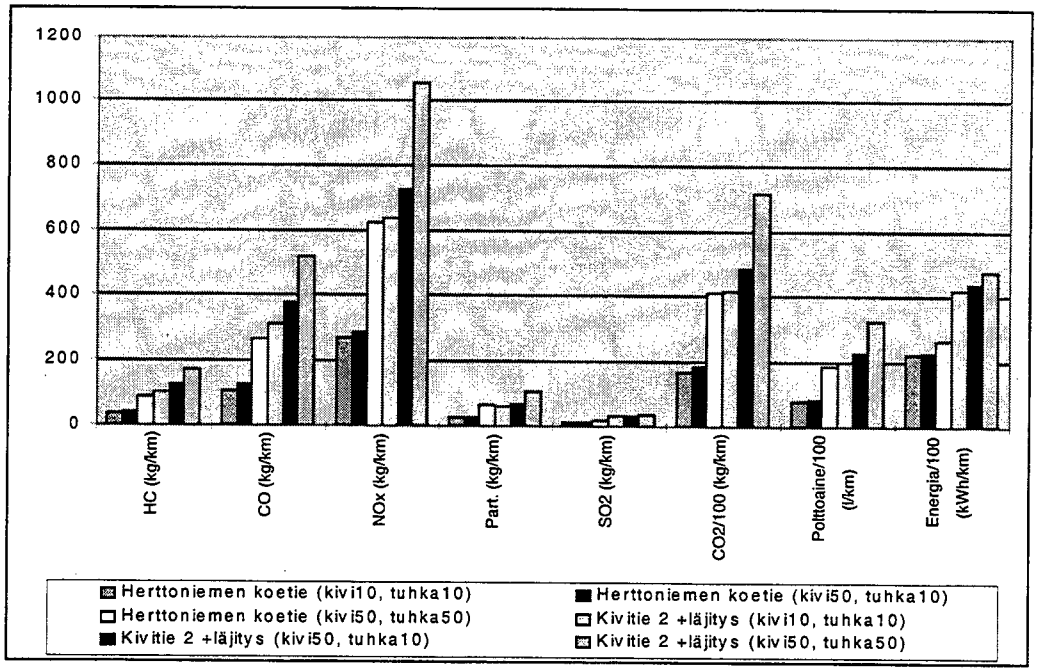
Kuva 15. Luonnonkiviainesten ja tuhkaseosten kuljetusmatkan vaikutus energian- ja polttoaineen kulutukseen ja päästöihin tuhkatiessä ja sen vertailuvaihtoehdossa.

Kuvasta 15 nähdään kuljetusmatkojen vaikutus tuhkatiessä ja sen vertailuvaihtoehdossa. Jos luonnonkiviainesten kuljetusmatka lyhenisi 50:stä 10:een kilometriin, putoaisi energian kulutus 12 - 16 % ja polttoaineen kulutus 39 - 46 %. Päästöt vähenisivät silloin 18 - 49 %. Eniten vähenisivät hiilivety- ja häkäpäästöt ja vähiten rikkidioksidipäästöt. Jos lentotuhkaseosten kuljetusmatka pitenisi 10:stä 50:een kilometriin, kasvaisi energian kulutus 6 - 10 % ja polttoaineen kulutus 20 - 46 %. Päästöt kasvaisivat 12 - 51 %. Päästöistä kasvaisivat eniten hiukkas-, NO_x- ja hiilidioksidipäästöt.

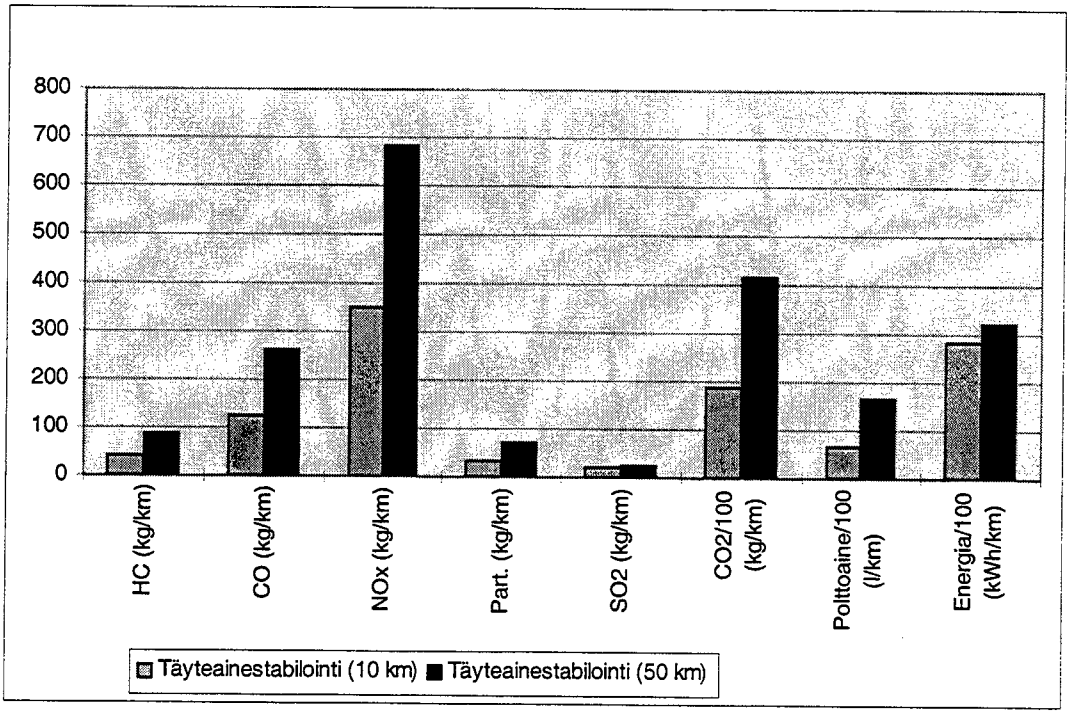
Kuvasta 16 nähdään kuljetusmatkojen vaikutus Herttoniemen koetiessä ja sen vertailuvaihtoehdossa. Luonnonkiviainesten kuljetusmatka ei vaikuttaisi paljoakaan Herttoniemen koetien energian- ja polttoaineen kulutukseen tai päästöihin, sillä käytettyjen luonnonkiviainesten määrä on siinä pieni. Vaikutukset olisivat 2 - 14 %. Sen sijaan kivitie2+läjitys-vaihtoehdossa luonnonkiviainesten kuljetusmatkan lyhentyessä 50:stä 10:een kilometriin putoaisi energiankulutus 60 % ja polttoaineen kulutus 47 %. Päästöt vähenisivät 12 - 51 %.

Tuhkaseosten kuljetusmatkan piteneminen 10:stä 50:een kilometriin kasvattaisi huomattavasti energian- ja polttoaineen kulutusta ja päästöjä Herttoniemen koetiessä, koska sen sisältämä tuhkamäärä suhteessa kivimäärään on muita suurempi. Energian kulutus kasvaisi 17 % ja polttoaineen kulutus 117 %. Päästöt kasvaisivat 43 - 139 %. Eniten kasvaisivat hiukkas-, CO_2- ja NO_x-päästöt. Kivitie2+läjitysvaihtoehtoon tuhkaseosten kuljetusmatkan pitenemisellä ei olisi yhtä suurta vai-

kutusta. Energian kulutus kasvaisi 9 % ja polttoaineen kulutus 44 %. Päästöt kasvaisivat 18 - 54 %.



Kuva 16. Luonnonkiviainesten ja tuhkaseosten kuljetusmatkan vaikutus energian- ja polttoaineen kulutukseen ja päästöihin Herttoniemen koetiessä ja sen vertailuvaihtoehdossa.



Kuva 17. Tuhkaseosten kuljetusmatkan vaikutus täyteainestabiloinnin energian- ja polttoaineen kulutukseen sekä päästöihin.

Kuvasta 17 ilmenee, että täyteainestabiloinnissa tuhkaseosten kuljetusmatkan piteneminen 50 kilometriin kasvattaisi HC- ja CO-päästöjä 110 %. Hiukkas- ja CO_2-päästöt kasvaisivat 122 %, NO_x-päästöt 95 % sekä SO_2-päästöt 37 %. Energian kulutus kasvaisi 14 % ja polttoaineen kulutus 150 %.

Nähdään, että tietyillä valinnoilla, esimerkiksi juuri kuljetusmatkan valinnalla, voidaan vaikuttaa huomattavasti elinkaaritarkastelun lopputuloksiin. Tämän takia on hyvin tärkeää, että kaikki tehdyt valinnat, oletukset ja rajaukset esitetään aina täsmällisesti elinkaaritarkastelun yhteydessä.

7.3 TULOSTEN ARVIOINTI JA VERTAILU

Taulukossa 16 ja kuvassa 18 on esitetty yhteenlaskettuna tärkeimmät ympäristökuormitukset tuhkateissä ja niiden vertailuvaihtoehdossa 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Asfaltoinnin kuormitukset eivät ole tarkastelussa mukana. Taulukossa on esitetty vertailun vuoksi myös tieliikenteen päästöt olettaen liikennemääräksi 1000 ajoneuvoa/päivä.

Taulukko 16. Tuhkateiden ja kivitie+läjityksen ympäristövaikutusten vertailu.

Vaikutus	Yksikkö	TuhkatieAB	Tuhka-tieC	Kivi-tie1+ Läjitys	Liikenne[3]
Raaka-aineet	t/km				
-luonnonraaka-aineet		13 810-13 960	13 810	40 000	
-uusioraaka-aineet		11 180-11 530	11 430	11 180	
Yhteensä		24 990-25 490	25 240	51 180	
Vesi	t/km	2 590-2 660	2 640	2 560	
Polttoaineen kulutus	l/km	22 500	61 000	50 000	1 590 000
Energian kulutus	kWh/km	41 200	18 4000	67 100	20 800 000
Päästöt ilmaan	kg/km				
-HC		143	155	329	
-CO		435	617	1 000	19 500
-NO_x		789	1 140	1 608	115 000
-hiukkaset[4]		78	116	164	6 500
-SO_2		33	94	60	5 500
-CO_2		54 980	129 900	117 000	5 000 000
-pöly[1] (2-40 µm)		6513	6 513	9 213	
Päästöt maaperään	kg/km				
-sulfaatti		17 300	17 300	12 100	
-kloridi		1 510	1510	1 370	
-barium		126	126	6,9	
-molybdeeni		57	57	26	
-vanadiini		6,6	6,6	0,46	
-kromi		<14,3	<14,3	<11,9	
Maan käyttö	m^2/km	10 000	10000	11 118	
Melu	dBA • h	107 600	107 800	253 300	
Onnettomuusriski[2]	kpl	0,0066	0,0066	0,0164	
Vaikutukset käyttöominaisuuksiin		ei tarkasteltu	ei tarkasteltu	-	

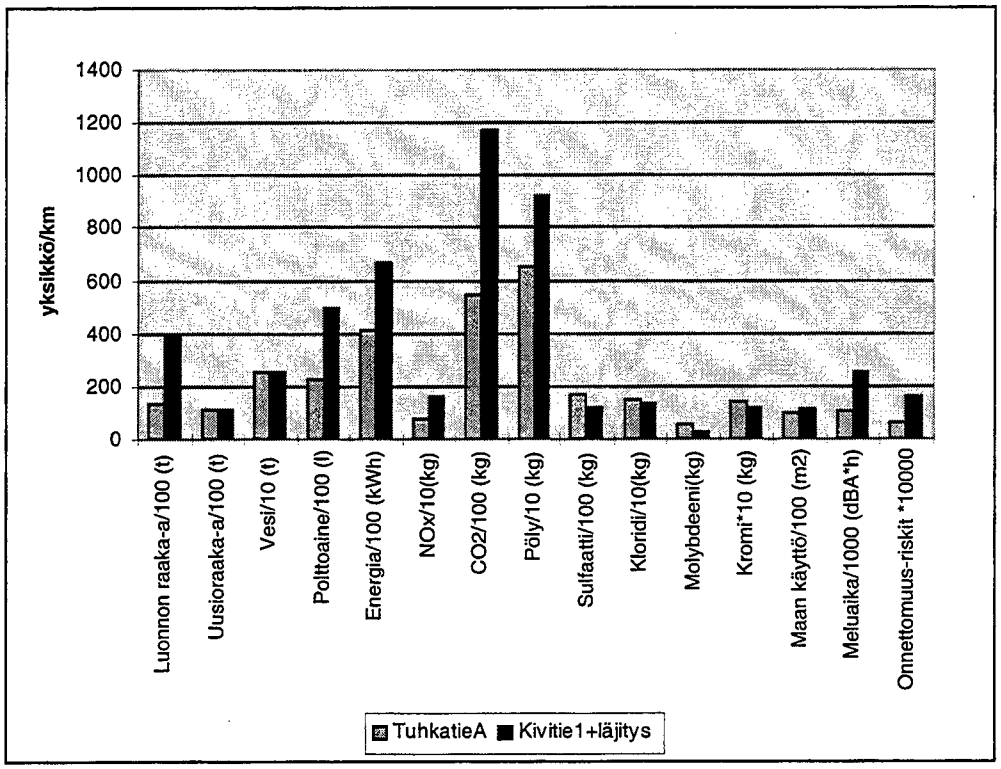
[1]murskaus-, kuormaus- ja kuljetusvaiheiden pöly (ei sisällä pakokaasujen hiukkasia)
[2]todennäköisten onnettomuuksien lukumäärä kuljetusten aikana/rakennettu tiekilometri
[3]liikenteen kuormitukset 50 vuoden aikana, oletettu liikennemäärä 1000 ajoneuvoa/päivä, ajoneuvot oletettu dieselkäyttöisiksi (Häkkinen & Mäkelä 1996)
[4]työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöt

Taulukosta puuttuvat ne kuormitukset, jotka jouduttiin tiedon puutteen vuoksi jättämään tarkastelun ulkopuolelle tai ei muuten pystytty arvioimaan, esim. soran oton vaikutukset pohjaveteen.

Verrattaessa tuhkatietä kivitie1+läjitykseen, nähdään, että suurin osa kuormituksista on tuhkatie-vaihtoehdossa huomattavasti pienempiä. Luonnonraaka-aineiden kulutus on 65 % pienempi, energian kulutus on 40 % pienempi ja polttoaineen kulutus on 55 % pienempi. Päästöt ilmaan ovat tuhkatiellä 43 - 55 % pienemmät. Maan käyttö on 10 % pienempi, melua kuvaava meluaika on 60 % pienempi ja onnettomuusriski myös 60 % pienempi. Poikkeuksena ovat sivutuotteista liukenevista aineista aiheutuvat päästöt maaperään, jotka ovat tuhkatiellä 9 - 95 % suuremmat kuin kivitie1+läjitys-vaihtoehdossa.

Energian- ja polttoaineen kulutus kasvavat suhteessa käytettyjen raaka-aineiden määrään. Lisäksi polttoaineen kulutukseen vaikuttavat huomattavasti luonnonkiviainesten pitkät kuljetusmatkat. Tämän elinkaarianalyysin tulokset kuvaavat tilannetta pääkaupunkiseudulla, koska siellä luonnonkiviainekset joudutaan tuomaan melko kaukaa. Jos tarkasteltaisiin tilannetta sellaisessa paikassa, jossa kiviainekset tuotaisiin lähempää, tilanne olisi toinen ja elinkaarianalyysin tuloskin saattaisi olla aivan erilainen, kuten edellisessä luvussa on todettu. Pitkät kuljetusmatkat kasvattavat myös meluaikaa ja onnettomuusriskiä.

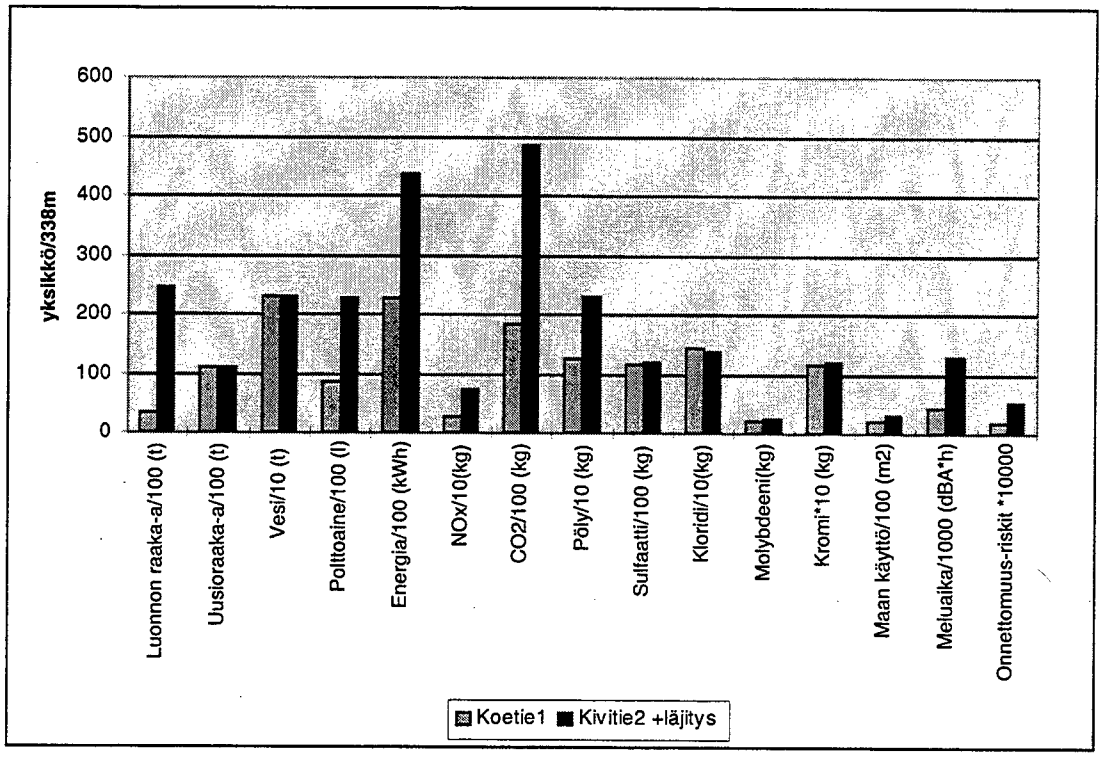
Tieliikenteestä aiheutuvat kuormitukset ovat 30 - 300-kertaisia verrattuna muihin elinkaaren aikaisiin kuormituksiin.



Kuva 18. Tuhkatien ja kivitie1+läjityksen ympäristövaikutusten vertailu.

Sementin käyttö lisäaineena kantavan kerroksen alaosassa kasvattaa huomattavasti tuhkatien ympäristökuormituksia. Polttoaineen kulutus kasvaa 2,7-kertaiseksi ja energian kulutus 4,5-kertaiseksi. Päästöt kasvavat 8 - 185 %. Eniten kasvavat rikkidioksidi- ja hiilidioksidipäästöt. Muut kuormitukset pysyvät suurin piirtein samoina. Sementin aiheuttama kuormitusten kasvu johtuu suurimmaksi osaksi sementin valmistuksen kuluttamasta suuresta energiamäärästä ja siitä aiheutuvista päästöistä.

Taulukossa 17 ja kuvassa 19 on esitetty yhteenlaskettuna Herttoniemen koeteiden ja niiden vertailuvaihtoehdon tärkeimmät ympäristökuormitukset 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Asfaltoinnin kuormitukset eivät ole tarkastelussa mukana. Taulukossa on esitettu vertailun vuoksi myös liikenteen päästöt olettaen liikennemääräksi 1 000 ajoneuvoa/päivä.



Kuva 19. Herttoniemen koetien ja kivitie2+läjityksen ympäristövaikutusten vertailu.

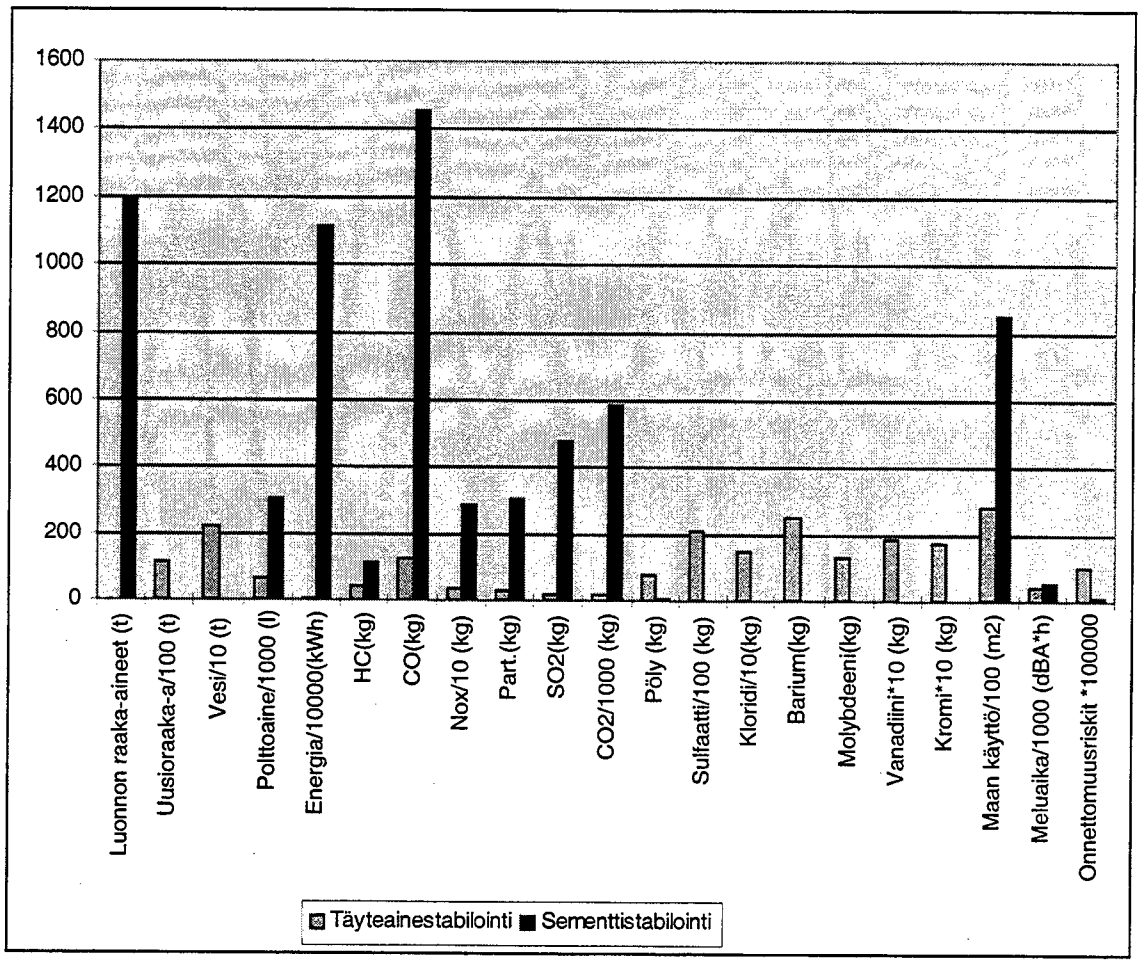
Taulukko 17. Herttoniemen koetien ja kivitie2+läjityksen ympäristövaikutusten vertailu.

Vaikutus	Yksikkö	Koetie1	Koetie2	Kivitie2+ läjitys	Liikenne[3]
Raaka-aineet	t/338 m				
-luonnonraaka-aineet		3280	3 350	24 600	
-uusioraaka-aineet		11 180	11 140	11 180	
Yhteensä		14 460	14 490	35 780	
Vesi	t/338 m	2 308	2 300	2 308	
Polttoaineen kulutus	l/338 m	8 544	24 170	22 890	537 000
Energian kulutus	kWh/338 m	22 920	80 880	43 800	7 040 000
Päästöt ilmaan	kg/338 m				
-HC		43	48	125	
-CO		126	201	379	6 600
-NO_x		291	436	724	38 900
-hiukkaset[4]		28	44	71	2 200
-SO_2		14	38	33	1 900
-CO_2		18 470	48 930	48 520	1 690 000
-pöly[1] (2-40 µm)		1 276	1 276	2 300	
Päästöt maaperään	kg/338 m				
-sulfaatti		11 800	11 800	12 100	
-kloridi		1 440	1 440	1 370	
-barium		2,2	2,2	6,9	
-molybdeeni		23	23	26	
-vanadiini		0,26	0,26	0,46	
-kromi		<11,7	<11,7	<11,9	
Maan käyttö	m^2/338 m	2 028	2 028	3 146	
Melu	dBA • h	42 746	42 842	129 514	
Onnettomuusriski[2]	kpl	0,0017	0,0017	0,0053	
Vaikutukset käyttö-ominaisuuksiin		ei tar-kasteltu	ei tar-kasteltu	-	

[1]murskaus-, kuormaus- ja kuljetusvaiheiden pöly (ei sisällä pakokaasujen hiukkasia)
[2]todennäköisten onnettomuuksien lukumäärä kuljetusten aikana/rakennettu tiekilometri
[3]liikenteen kuormitukset 50 vuoden aikana, oletettu liikennemäärä 1 000 ajoneuvoa/päivä, ajoneuvot oletettu dieselkäyttöisiksi (Häkkinen & Mäkelä 1996)
[4]työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöt

Koska Herttoniemen koetie sisältää suhteessa suuremman määrän tuhkaseosta, korostuvat siinä enemmän tuhkaseoksen aiheuttamat kuormitukset. Silti kivitie2+läjitys-vaihtoehdon aiheuttamat kuormitukset ovat pääosin suurempia kuin koetien. Luonnonraaka-aineiden kulutus on kivitie2+läjitys-vaihtoehdossa noin 7-kertainen koetiehen nähden. Herttoniemen koetien energian kulutus on noin 50 % pienempi ja polttoaineen kulutus noin 60 % pienempi kuin kivitie2+läjitys-vaihtoehdon. Myös koetien päästöt ovat 33 - 42 % pienemmät kuin vertailuvaihtoehdon päästöt. Maan käyttö on 36 % pienempi ja onnettomuusriski ja meluaika ovat noin 70 % pienemmät koetiessä.

Taulukossa 18 ja kuvassa 20 on esitetty täyteaine- ja sementtistabiloinnin tärkeimmät ympäristökuormitukset.



Kuva 20. Täyteaine- ja sementtistabiloinnin ympäristövaikutusten vertailu.

Taulukko 18. Täyteaine- ja sementtistabiloinnin ympäristövaikutusten vertailu.

Vaikutus	Yksikkö	Täyteaine-stabilointi	Sementti-stabilointi
Raaka-aineet	t/yksikkö		
-luonnonraaka-aineet		-	1 190
-uusioraaka-aineet		11 180	-
Yhteensä		11 180	1 190
Vesi	t/yksikkö	2 236	-
Polttoaineen kulutus	l/yksikkö	6 670	305 800
Energian kulutus	kWh/yksikkö	28 260	1 116 500
Päästöt ilmaan	kg/yksikkö		
-HC		42	113
-CO		125	1 457
-NO_x		349	2 900
-hiukkaset[4]		32	305
-SO_2		19	479
-CO_2		18 710	588 800
-pöly (2-40 µm)		77,4[1]	5,3[2]
Päästöt maaperään	kg/yksikkö		
-sulfaatti		21 000	ei tietoja
-kloridi		1 510	
-barium		252	
-molybdeeni		130	
-vanadiini		18,8	
-kromi		<17,4	
Maan käyttö	m^2/yksikkö	28 250	17 690
Melu	dBA • h	43 486	54 400
Onnettomuusriski[3]	kpl	0,001	0,0001
Vaikutukset käyttö-ominaisuuksiin		ei tarkasteltu	ei tarkas-teltu

[1]kuormaus- ja kuljetusvaiheiden pöly (ei sisällä pakokaasujen hiukkasia)
[2]kuljetusvaiheen pöly
[3]todennäköisten onnettomuuksien lukumäärä kuljetusten aikana/rakennettu tiekilometri
[4]työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöt

Täyteaine- ja sementtistabilointi eroavat ympäristökuormituksiltaan hyvin paljon toisistaan. Sementtistabiloinnin ympäristökuormitukset ovat huomattavasti suuremmat kuin tuhkastabiloinnin. Tämä johtuu siitä, että sementin valmistus on erittäin suuri kuormitusten aiheuttaja ja siitä, että sementin valmistuksen osuus stabiloinnin kokonaistyömäärästä on hyvin merkittävä. Sementtistabiloinnin polttoaineen kulutus on 46-kertainen ja energian kulutus 40-kertainen verrattuna täyteainestabilointiin. Sementtistabiloinnissa HC-päästöt ovat 3-kertaiset, CO-päästöt 12-kertaiset, NO_x-päästöt 8-kertaiset, hiukkaspäästöt 10-kertaiset, SO_2-päästöt 25-kertaiset ja CO_2-päästöt 31-kertaiset täyteainestabilointiin nähden. Meluaika on 25 % suurempi sementtistabiloinnissa kuin täyteainestabiloinnissa. Maan käyttö on täyteainestabiloinnissa 60 % suurempi ja onnettomuusriski 10-kertaa suurempi.

Koska sementin käyttö lisää kuormituksia näin huomattavasti, tulisi tienrakennuksessa ja maan stabiloinnissa harkita muiden vaihtoehtoisten aineiden käyttöä mahdollisuuksien mukaan.

7.4 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Kun tarkastellaan tämän elinkaarianalyysin tuloksia, eli eri vaihtoehtojen ympäristökuormituksia, näyttäisi siltä, että tuhkaseosten käyttö tienrakennuksessa ja maan stabiloinnissa olisi ympäristöystävällisempää kuin normaalien kiviainesten käyttö ja sivutuotteiden sijoitus kaatopaikalle.

Tuloksia tarkastellessa tulee kuitenkin pitää mielessä tarkastelun rajaukset ja tehdyt oletukset. Valitulla tierakenteella (käytettyjen ainesten valinnalla ja kerrospaksuuksilla), kuljetusmatkoilla ja konevalinnoilla on merkittävä vaikutus tutkimuksen lopputulokseen. Erityisesti kuljetusmatkat kasvattavat energian- ja polttoaineen kulutusta ja päästöjä. Tämän vuoksi kuljetusmatkojen pituus tulisi pyrkiä mahdollisuuksien mukaan minimoimaan valitsemalla raaka-aineita, jotka ovat saatavilla läheltä. Lisäksi tienrakennuksessa tulisi pyrkiä käyttämään mahdollisimman vähän luonnonkiviaineksia (soraa ja hiekkaa) ja suosimaan mahdollisuuksien mukaan uusioraaka-aineita ja kalliomurskeita. Pölyämistä tulisi pyrkiä vähentämään kaikin mahdollisin keinoin mm. kastelemalla kuormat ja ajotiet sekä käyttämällä louhinnassa, murskaamoilla ja asfalttiasemilla pölynpoistolaitteita ja erilaisia suojauksia. Meluhaittoja tulisi myös pyrkiä estämään erilaisilla meluesteillä ja -suojauksilla sekä ottamalla huomioon tarvittavat suojaetäisyydet. Pohjavesien likaantumista voidaan pyrkiä estämään valitsemalla toimintapaikka huonosti vettä läpäisevälle tai vettä pidättävälle maaperälle.

Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käytössä tulisi em. asioiden lisäksi välttää työmaalla varastointia pölyämisen ehkäisemiseksi. Jos sivutuotteita joudutaan varastoimaan, tulisi kasat ehdottomasti peittää. Suositeltavinta olisi se, että sivutuotteet ajettaisiin suoraan tierakenteeseen ja tiivistettäisiin heti. Olisi myös suositeltavaa, että tie asfaltoitaisiin mahdollisimman pian haitallisten suotovesien määrän minimoimiseksi.

Tässä elinkaariarvioinnissa ei ole otettu huomioon eri kuormitusten painoarvoja, eli ei ole tehty eri kuormitusten arvottamista suhteessa toisiinsa. Elinkaarianalyysin luokitteluvaiheessa yleensä luokitellaan ympäristökuormitukset useaan ryhmään ja arvioidaan erilaisten kuormitusten suhteellista vaikutusta kuhunkin ympäristöongelmaan. Ympäristökuormitusten suhteellinen vaikutus ympäristöön ilmoitetaan kertomalla ne painotustekijöillä. Näitä painotustekijöitä ei ole kuitenkaan vielä yleisesti määritelty. Lisäksi eri ympäristökuormitustekijöillä on erilainen merkitys eri alueilla, joten kaikille ympäristökuormituksille tuskin voidaan yhteisiä painotustekijöitä määrittää. Erilaisilla painoarvoilla voi eri vaihtoehtojen paremmuus suhteessa toisiinsa muuttua ratkaisevasti. Tässä tutkimuksessa eri vaikutusten painottaminen jätettiin kunkin lukijan oman harkinnan varaan.

8 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida lentotuhkan ja puolikuivan rikinpoistotuotteen seoksen maarakennuskäytön elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset ja verrata niitä sivutuotteiden käytön vaihtoehtona olevan luonnonraaka-aineiden käytön vaikutuksiin. Lisäksi oletettiin, että luononraaka-aineita käytettäessä sivutuotteet sijoitetaan läjitysalueelle, mikä on maarakennuskäytön todennäköisin vaihtoehto. Tarkastelun lähtökohtana oli pääkaupunkiseudulla syntyvien energiantuotannon sivutuotteiden sijoittaminen maarakennuskohteisiin. Raaka-aineiden saatavuus ja kuljetusmatkat on siksi arvioitu pääkaupunkiseudun olosuhteiden perusteella.

Tarkasteltavat käyttökohteet

Tarkasteltaviksi käyttökohteiksi pyrittiin valitsemaan tähänastisten kokemusten perusteella parhaiten energiantuotannon sivutuotteille soveltuvat kohteet. Ensimmäiseksi tarkasteltavaksi hyötykäyttökohteeksi valittiin teollisuusalueelle merenrannan läheisyyteen rakennettava tie, jossa jakava kerros ja kantavan kerroksen alaosa rakennetaan lentotuhka-rikinpoistotuote-seoksesta (LT/RPT-seos). Vertailukohteena oli normaaleista kiviaineksista rakennettu tie ja LT/RPT-seoksen läjitys eli sijoitus maankaatopaikalle. Lisäksi yhtenä vertailukohteena tarkasteltiin Herttoniemenrantaan rakennettua koetietä, johon oli sijoitettu lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta. Tämä ei ollut kuitenkaan suoraan verrannollinen muihin tierakenteisiin, koska tien jakava kerros oli huomattavasti paksumpi kuin muissa tierakenteissa ja siihen oli sijoitettu suhteessa suurempi määrä LT/RPT-seosta. Herttoniemen koetietä verrattiin toiseen normaaleista kiviaineksista rakennettuun tiehen, jonka paksuus oli sama.

Toinen tarkasteltava hyötykäyttökohde oli saven massastabilointi puistoalueen tai kävelytien pohjarakenteissa. Tutkimuksessa verrattiin täyteaineen (LT/RPT-seos) ja sementin käyttöa saven stabiloinnissa.

Materiaali- ja energiavirta-analyysi sekä tarkastelun rajaukset

Toiminnalliseksi yksiköksi valittiin eri tierakenteiden tarkastelussa yhden kilometrin pituinen 10 metriä leveä tie. Herttoniemen koetien ja sen vertailutien toiminnallinen yksikkö oli 338 m pitkä ja 6 m leveä tieosuus. Tämä tien pituus valittiin siten, että sijoitettu sivutuotemäärä oli sama kuin muissa tievaihtoehdoissa. Läjitykseen ja täyteainestabilointiin oletettiin myös sijoitettavan sama sivutuotemäärä kuin tierakenteeseen. Stabilointikohteissa toiminnallinen yksikkö oli stabiloitavan saven määrä (22 360 tonnia), joka määräytyi sijoitettavan täyteainemäärän mukaan.

Tarkasteluajaksi valittiin 50 vuotta, mikä voidaan olettaa normaaliksi käyttöajaksi tierakenteelle. Tässä tutkimuksessa toiminta tarkasteluajan jälkeen rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen elinkaari rajattiin alkavaksi tuotantolaitoksen siilosta. Luonnon kiviainesten elinkaari oletettiin alkavaksi kiviaineksen (soran tai hiekan) otosta. Louheen ja murskeen elinkaari oletettiin alkavaksi kalliosta, josta ne louhitaan. Lisäaineina käytettiin sementtiä ja vettä. Sementistä otettiin huomioon koko elinkaari ja vedestä vain sen kulutus.

Tutkimuksessa selvitettiin tien rakennuksen aiheuttamat ympäristökuormitukset, joita ovat: energian, polttoaineen ja raaka-aineiden kulutus, päästöt ilmaan ja maaperään, melu, pöly, maankäyttö sekä kuljetusten onnettomuusriskit. Tien elinkaaren aikaisista muista kuormituksista arvioitiin sivutuotteista maaperään liukenevia haitta-aineita 50 vuoden tarkastelujakson aikana.

Tierakenteissa valittiin kerrospaksuudet ja kiviainesten raekoot olettaen, että tie on teollisuusalueelle rakennettava tie, joka luokitellaan katuluokkaan 5. Kaikki tiet oletettiin päällystettäväksi asfaltilla (AB 20). Asfaltointia ei ole kuitenkaan otettu huomioon laskuissa, koska asfaltoinnin aiheuttamat ympäristökuormitukset ovat samat eri vaihtoehdoissa.

Työkoneiden käyttöaikojen laskemisessa jouduttiin tekemään monia oletuksia, koska kaikki työvaiheet voidaan suorittaa monella tavalla ja useilla erilaisilla ja -tehoisilla työkoneilla. Laskuissa käytettiin teholtaan keskitasoisia koneita, joiden työvuorokapasiteetit olivat saatavilla (TS-tietokortit). Koneiden käyttöajat laskettiin toiminnallista yksikköä kohti. Työkoneiden energian- ja polttoaineenkulutus laskettiin käyttöaikojen ja kullekin koneelle lasketun keskimääräisen nimellistehon, käyttötehon ja ominaiskulutuksen avulla. Koneiden päästöt laskettiin käyttäen päästökertoimia. Tutkimuksessa oletettiin, että työkoneet ja kuljetusvälineet saavat energiansa dieselpolttoaineesta. Ainoastaan tuhkan käsittelyyn käytetyt laitteet voimalaitoksella toimivat voimalaitoksen omalla sähköllä.

Muut työkoneiden elinkaaren ajalta aiheutuneet kuormitukset (esim. työkoneiden valmistus) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Poltto- ja räjähdysaineiden valmistus ja kuljetukset jätettiin myös tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden vaikutus oletettiin tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömäksi.

Kuljetusmatkoina käytettiin arvioituja keskimääräisiä kuljetusmatkoja pääkaupunkiseudulla. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että murske tuodaan 10 km päästä ja hiekka ja sora 50 km päästä 25 tonnin kuorma-autolla. LT/RPT-seoksen kuljetusmatkaksi oletettiin 10 km ja kuljetusvälineeksi 35 tonnin kuorma-auto. Lisäksi oletettiin, että kiviainekset ja tuhka oli kostutettu pölyämisen estämiseksi.

Liikenteen aiheuttamat kuormitukset tien käytön aikana jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska olemassa olevilla tiedoilla ei pystytty osoittamaan, että eri vaihtoehdoilla olisi tässä suhteessa eroa. Tien käytön aikainen kunnossapito, joka sisältää tien korjauksista aiheutuvat kuormitukset, jouduttiin myös jättämään huomiotta, koska aiheesta ei löytynyt tarpeeksi tietoja. Samoin muut tien kunnossapidosta (esim. suolaus ja hiekoitus) aiheutuvat kuormitukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Tulokset ja niiden arviointi

Tämän tutkimuksen perusteella näyttäisi siltä, että tuhkaseosten käyttö tienrakennuksessa ja maan stabiloinnissa olisi ympäristöystävällisempää kuin normaalien kiviainesten käyttö ja sivutuotteiden sijoitus kaatopaikalle.

Verrattaessa tuhkatietä luonnonkiviaineksista valmistettuun tiehen, nähdään, että suurin osa kuormituksista oli tuhkatievaihtoehdossa huomattavasti pienempiä. Luonnonraaka-aineiden kulutus oli 65 % pienempi, energian kulutus oli 40 % pienempi ja polttoaineen kulutus oli 55 % pienempi. Päästöt ilmaan olivat tuhkatiellä 43 - 55 % pienemmät. Maan käyttö oli 10 % pienempi, melua kuvaava meluaika oli 60 % pienempi ja kuljetuksista aiheutuva onnettomuusriski 60 % pienempi. Poikkeuksena olivat sivutuotteista liukenevista aineista aiheutuvat päästöt maaperään, jotka olivat tuhkatiellä 9 - 95 % suuremmat kuin luonnonkiviainesvaihtoehdossa. Luonnonkiviainesvaihtoehto sisältää myös vastaavan tuhkaseosmäärän läjityksestä aiheutuvat kuormitukset.

Koska Herttoniemen koetie sisälsi suhteessa suuremman määrän tuhkaseosta kuin tuhkatie, korostuivat siinä enemmän tuhkaseoksen aiheuttamat kuormitukset. Silti kiviainesvaihtoehdon aiheuttamat kuormitukset olivat pääosin suurempia kuin Herttoniemen koetien.

Energian- ja polttoaineen kulutus kasvoivat suhteessa käytettyjen raaka-aineiden määrään. Lisäksi polttoaineen kulutukseen vaikuttivat huomattavasti luonnonkiviainesten pitkät kuljetusmatkat. Pitkät kuljetusmatkat kasvattivat myös meluaikaa ja onnettomuusriskiä.

Täyteaine- ja sementtistabilointi erosivat ympäristökuormituksiltaan hyvin paljon toisistaan. Sementtistabiloinnin ympäristökuormitukset olivat huomattavasti suuremmat kuin tuhkastabiloinnin. Tämä johtui siitä, että sementin valmistus on erittäin suuri kuormitusten aiheuttaja ja siitä, että sementin valmistuksen osuus stabiloinnin kokonaistyömäärästä on hyvin merkittävä. Sementtistabiloinnin kuormitukset olivat 8 - 40-kertaiset täyteainestabilointiin nähden. Koska sementin käyttö lisäsi kuormituksia näin huomattavasti, tulisi tienrakennuksessa ja maan stabiloinnissa harkita muiden vaihtoehtoisten aineiden käyttöä mahdollisuuksien mukaan.

Tulosten tarkastelussa tulee kuitenkin pitää mielessä tarkastelun rajaukset ja tehdyt oletukset. Valitulla tierakenteella (käytettyjen ainesten valinnalla ja kerrospaksuuksilla), kuljetusmatkoilla ja konevalinnoilla on merkittävä vaikutus tutkimuksen lopputulokseen. Erityisesti kuljetusmatkat kasvattavat energian- ja polttoaineen kulutusta ja päästöjä. Tämän vuoksi kuljetusmatkojen pituus tulisi pyrkiä mahdollisuuksien mukaan minimoimaan valitsemalla raaka-aineita, jotka ovat saatavilla läheltä. Lisäksi tienrakennuksessa tulisi pyrkiä käyttämään mahdollisimman vähän luonnonkiviaineksia (soraa ja hiekkaa) ja suosimaan mahdollisuuksien mukaan uusioraaka-aineita ja kalliomurskeita. Pölyämistä tulisi pyrkiä vähentämään kaikin mahdollisin keinoin mm. kastelemalla kuormat ja ajotiet sekä käyttämällä louhinnassa, murskaamoilla ja asfalttiasemilla pölynpoistolaitteita ja

erilaisia suojauksia. Meluhaittoja tulisi myös pyrkiä estämään erilaisilla meluesteillä ja -suojauksilla sekä ottamalla huomioon tarvittavat suojaetäisyydet. Pohjavesien likaantumista voidaan pyrkiä estämään valitsemalla toimintapaikka huonosti vettä läpäisevälle tai vettä pidättävälle maaperälle.

Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käytössä tulisi em. asioiden lisäksi välttää työmaalla varastointia pölyämisen ehkäisemiseksi. Jos sivutuotteita joudutaan varastoimaan, tulisi kasat ehdottomasti peittää. Suositeltavinta olisi se, että sivutuotteet ajettaisiin suoraan tierakenteeseen ja tiivistettäisiin heti. Olisi myös suositeltavaa, että tie asfaltoitaisiin mahdollisimman pian haitallisten suotovesien määrän minimoimiseksi.

Tämän elinkaarianalyysin tulokset kuvaavat tilannetta pääkaupunkiseudulla, koska siellä luonnonkiviainekset joudutaan tuomaan melko kaukaa. Jos tarkasteltaisiin tilannetta sellaisessa paikassa, jossa kiviainekset tuotaisiin lähempää, tilanne olisi toinen ja elinkaarianalyysin tuloskin saattaisi olla aivan erilainen.

Tutkimuksen aikana suurimpia ongelmia aiheutti tietojen saatavuus, mikä vaihteli kuormituksittain hyvin paljon. Myös tietojen luotettavuus oli eri kuormituksilla erilainen. Tutkimuksesta jouduttiin rajaamaan kokonaan pois joitakin ympäristökuormituksia tiedon puutteen takia. Tiedon saatavuuteen vaikutti sivutuotteiden osalta se, että sivutuotteiden hyötykäyttö on vielä vakiintumatonta. Esimerkiksi tuhkarakentamisen pölypäästöjä eri työvaiheista ollaan vasta tutkimassa.

LÄHDELUETTELO

AFNOR.1993. Draft French Standard X 30 - 300. Life cycle analysis. AFNOR, October 1993. 25 s.

AIA. 1996. Environmental Resource Guide. The American Institute of Architects.

Arovaara, H. 1996. Suullinen tiedonanto.

Berge, B. 1995. Bygningsmaterialer for en baerekraftig utvikling. Nordisk komité for byggningsbestemmelser, NKB Utskotts och arbetsrapporter 1995:07.

Blomster, D. 1989. Pitkäsuon täyttösuunnitelma. Imatran Voima Oy. Vantaa. 9 s.

Broers, J., Hoefnagels, F. & Roskamp, H. 1994. Life Cycle Assessment of Road Embankment in Phosphogypsum. Preliminary Results. In: Goumans, J., van der Sloot, H. & Aalbers, T. (ed.) Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Elsevier Science B.V. S. 539 - 542.

CSA. 1994. Life Cycle Assessment Guideline. Draft. Canadian Standards Association 121 s.

Dartsch, B. 1993. Wechselwirkungen zwischen Material und Umwelt am Beispiel Kraftwerksnebenprodukte. In: Materialen in ihrer Umwelt. VDI Berichte Nr 1060. Düsseldorf. S. 229 - 237.

Eskola, P. 1997. Työkoneiden käyttöaikojen, energian- ja polttoaineen kulutuksen ja päästöjen laskeminen kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarvioinnin yhteydessä (julkaisematon). 43 s.

EPA. 1988. U.S. Environmental Protection Agency: Supplement B to compilation of air pollutant emission factors. AP-42. Research Triangle Park.

Finnveden, G. 1995. Treatment of solid waste in life-cycle assessment - some methodological aspects. In: Life Cycle Assessment and Treatment of Solid Waste. Proceedings of the International Workshop, September 28 - 29, 1995, Stockholm, Sweden.

Haapanen, M. & Oksanen, R. 1981. Kuljetustalous. Ekondata Oy. Lappeenranta. 267 s.

Hatva, T., Hyyppä, J., Ikäheimo, J., Penttinen, H. & Sandborg, M. 1993. Soranoton vaikutus pohjaveteen. Raportti V: Soranotto ja pohjaveden suojelu. Vesi- ja ympäristöhallituksen julkaisuja-sarja B 15. Helsinki. 119 s.

Heijungs, R. et al. 1992. Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guiden and Backgrounds. CML, Leiden University. Leiden. 130 s. + 100 s.

Himanen, V., Mäkelä, K., Alppivuori, K., Aaltonen, P. & Louhelainen, J. 1989. The monetary valuation of road traffic's environmental hazards. Espoo. VTT tiedotteita 943. 40 s.

Hjelmar, O., Hansen, E.A., Larsen, F. & Thomassen, H. 1991. Leaching and soil/groundwater transport of contaminants from coal combustion residues. EFP 1323/86-18 + 1323/86-19 + 1323/89-7 Elkraft A.m.b.A og EF (DGXII). Hørsholm, Vandkvalitetsinstituttet. 176 s.

Hyödynmaa, M. & Herranen, S. 1987. Työympäristön vaaratekijät rakentamisessa. Espoo. VTT tiedotteita 761. 46 s. + liitt.

Häkkinen, T. & Kronlöf, A. 1994. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointi. Espoo. VTT tiedotteita 1591. 61 s. + liitt.

Häkkinen, T. & Mäkelä, K. 1996. Environmental adaption of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. Espoo. VTT research notes 1752. 61 s.

ISO. 1994. Life cycle assessment - General principles and practices. Draft International Standard. ISO/CD 14040.

Kalliokoski, A. 1995. Tierakenteen elinkaarianalyysi. Diplomityö. Oulun Yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Rakentamistekniikan osasto. Tie- ja liikennetekniikka. Oulu. 105 s.

Karlstedt, P. & Halkola H. 1993. Ylijäämäsavien massastabilointi. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 61/93. Helsinki. 70 s.

Katu 90. 1991. Kadunrakennuksen tekniset ohjeet. Suomen kunnallisteknisen yhdistyksen julkaisu 11. Jyväskylä. 273 s.

Keoleian, G. & Menerey, D. 1993. Life Cycle Design Guidance Manual: Environmental Requirements and the Product System. Cincinnati, OH. US Environmental Protection Agency EPA600/R-92/226. 190 s.

Koski, P. 1995. Tierakentamisen ympäristökriteerit – Tierakentamisen ja rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten peruskartoitus. TPPT-projekti E5. Työraportti. Espoo. 57 s. + liitt.

Kylä-Setälä, A. & Assmuth, T. 1996. Suomen maaperän tila, kuormitus ja suojelu. Suomen Ympäristökeskus. Helsinki. 172 s.

Liimatainen, M. 1994. Jäteraaka-aineiden ja sivutuotteiden maanrakennuskäytön elinkaaritarkasteluista. Esiselvitys. VTT Kemiantekniikka.

Lindfors, L-G., Christiansen, K., Hoffman, L., Virtanen, Y., Junttila, V., Hanssen, O-J., Ronning, A., Ekvall, T. & Finnveden, G. 1995. Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment .

Lohja Rudus. 1995. Lentotuhkan käytön suunnittelu- ja rakentamisohje. 7 s.

Markkanen, T. 1996. Suullinen tiedonanto.

Matilainen, E. 1986. Ympäristönsuojelu tien- ja maarakennustöissä. RIL 163. Helsinki. 205 s.

Muleski, G. E., Pendleton, F. J. & Rugenstein, W. A. 1986. Measurement of fugitive emissions in a coal-fired power plant. EPRI-CS-4918-Vol. 3. California.

Mäkelä, K., Kanner, H. & Laurikko, J. 1996. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt: Liisa 95-laskentajärjestelmä. Espoo. VTT Tiedotteita 1772. 45 s.

Naturvårdsverk. 1983. Byggbuller. Julkaisu nro. 1561. Solna. 65 s.

Oasmaa, K. 1996. Suullinen tiedonanto.

Ollila, T. 1994. Voimalan jyly vaimeni. Työ, terveys, turvallisuus 13:1994.

Puranen, A. 1992. Polttomoottorikäyttöisten työkoneiden ympäristöpäästöt. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Turvallisuustekniikka, raportti 63. 72 s.

Ranta, J., Wahlstöm, M., Ruohomäki, J., Häkkinen, T. & Lindroos, P. 1987. Hiilivoimaloiden rikinpoistojätteet. Esitutkimus. Espoo. VTT Tiedotteita 741. 140 s. + liitt. 6 s.

Rasimus, K. 1996. Suullinen tiedonanto.

Reinikka, E. 1987. Louhinta-alan uusien säännösten tavoitteista ja vaikutuksista. Maansiirto 8:1987.

RIL 156. 1995. Maarakennus. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL. Helsinki. 493 s.

Ruostetoja, P. 1996. Kirjallinen tiedonanto.

Ruotoistenmäki, A., Jämsä, H. & Korkealaakso, J. 1997. TPPT-projekti E6 Elinkaarianalyysi. Väliraportti. Luonnos. 6.8.97.

Rämö, P. 1996. Kuntatekniikka 2:1996.

Rämö, P. 1997. Suullinen tiedonanto.

Schuurmans-Stehmann, A. 1994. Environmental life cycle analysis of construction products with and without recycling. In: Goumans, J., van der Sloot, H. & Aalbers, T. (ed.) Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. 1994. Elsevier Science B.V. S. 709 - 718.

SETAC. 1993. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of practice'.

Sloss, L. 1996. Residues from advanced coal-use technologies. IEA Coal Research. IEA Perspectives IEAPER/30. 40 s.

Steiger, P. 1996. Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein.

Stenström, B. 1989. Kartläggning av förorenande utsläpp från traktorer, arbetsmaskiner mm. Stockholm. Naturvårdsverk, projekt nr 124-560-89. 52 s.

Stenström, B. 1990. Kartläggning av förorenande utsläpp från motordrivna arbetsredskap. Stockholm. Naturvårdsverk, projekt nr 124-560-89. 23 s.

Stripple, H. 1995. Livsyckelanalys av väg. En modellstudie for inventering. Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning, IVL B 1210. Göteborg. 105 s.

Tielaitoksen selvityksiä 43/1993. Asfaltti- ja murskausasemien melun leviäminen. Helsinki. 15 s.

Tielaitoksen tilastoja 1996.

Tielaitos. 1994. Asfalttiasemien ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelu 1994. Tuotannon palvelukeskus. Helsinki. 24 s.

Tielaitos. 1995. Asfalttiasemien, kivenmurskaamojen ja öljysora-aseman pöly- ja melumittaukset. Uudenmaan tiepiiri. Helsinki. 31 s.

Tram, F., Thomsen, K., Jelnes, J., Hansen, K. & Treldal, J. 1994. Miljøinformation om bygge varer. Miljøministeriet. Miljøstyrelsen. Arbeidsrapp. nr. 9.

Wahlström, M. 1993. Utlakningstester för avfall. Espoo. Nordtest, NT Techn Report 193. 64 s.

Wahlström, M., Fällman, A-M., Hjelmar, O & Karstensen, K-H. 1993. Laktest för granulerat avfallsmaterial. Nordtest.

Weiss, N. L. 1985. SME Mineral Processing Handbook. Society of Mining Engineers. New York.

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden tuhkatierakenteissa A ja B

Eristyskrs Hiekka	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
irrotus ja kuormaus	KKH 17	36,8	1840	498	2,94	9,20	25,8	2,39	1,84	1362	89
kuljetus 50 km	KA 25	634	6160	11088	86,2	262	339	37,0	8,01	27412	84
levitys	PT 08	29,6	1302	398	2,08	6,51	19,5	1,69	1,30	1081	84
tiivistys	JK 20	4,5	61	18,0	0,098	0,305	0,915	0,079	0,061	48,8	92
tasaus	TH 14	2	120	35,0	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
Yhteensä		707	9483	12040	91,5	278	387	41,3	11,3	30000	

Penger LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		413	22715	-	*	*	1,03	*	0,87	548	*
annostelu sekoittimeen		34,2	5310	-	*	*	0,24	*	0,20	128	*
seoksen valmistus		17,1	1540	-	*	*	0,07	*	0,06	37	*
kuormaus	KA 35	54,9	53	137	1,58	2,96	4,38	0,26	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	127	660	1716	7,92	23,8	57,2	6,6	1,14	3916	84
levitys	PT 08	47,7	2099	642	3,36	10,5	31,5	2,73	2,10	1742	84
tiivistys	JK 20	4,7	63	19	0,101	0,315	0,945	0,082	0,063	50,4	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		288	9845	2549	13,1	38,0	96,1	9,83	3,69	5970	

Jakava krs LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		104	5696	-	*	*	0,26	*	0,22	138	*
annostelu sekoittimeen		8,53	1325	-	*	*	0,06	*	0,05	32	*
seoksen valmistus		4,27	385	-	*	*	0,02	*	0,01	9	*
kuormaus	KA 35	13,7	13	34,3	0,39	0,74	1,09	0,07	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	31,7	165	429	1,98	5,94	14,3	1,65	0,286	979	84
levitys	PT 08	25,2	1109	339	1,77	5,55	16,6	1,44	1,11	920	84
tiivistys	JK 20	8,7	117	34	0,187	0,585	1,76	0,152	0,117	93,6	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		94	3234	871	4,50	13,29	35,66	3,47	1,70	2130	

Kantava krs (alaosa) LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		104	5696	-	*	*	0,26	*	0,22	138	*
annostelu sekoittimeen		8,53	1325	-	*	*	0,06	*	0,05	32	*
seoksen valmistus		4,27	385	-	*	*	0,02	*	0,01	9	*
kuormaus	KA 35	13,7	13	34,3	0,39	0,74	1,09	0,07	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	31,7	165	429	1,98	5,94	14,3	1,65	0,286	979	84
levitys	PT 08	25,2	1109	339	1,77	5,55	16,6	1,44	1,11	920	84
tiivistys	JK 20	3,7	50	15	0,080	0,250	0,750	0,065	0,050	40,0	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		89	3167	852	4,39	13,0	34,7	3,4	1,6	2077	

Kantava krs (yläosa) Murske (<32 mm)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	11,8	413	142	0,66	1,65	4,96	0,413	0,413	330	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	1,59	650	590	-	0,398	0,155	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	5,4	402	118	0,563	1,61	5,63	0,402	0,402	322	90
louheen kuormaus	KKH 25t	13,8	1690	484	2,70	8,45	25,4	2,20	1,69	1251	89
louheen ajo murskaamoon	MA	14,7	2623	807	3,15	10,49	39,35	2,62	2,62	1941	91
murskaus	3-vaihe	14,4	5330	1614	8,53	21,32	63,96	5,33	5,33	4584	100
altakanto kasaan	CAT 980	11,3	1050	317	1,47	4,2	14,7	1,26	1,05	941	84
kuormaus	KKH 17	14,7	735	199	1,18	3,68	10,3	0,956	0,735	544	89
kuljetus 10 km	KA 25	117	776	1397	10,9	33,0	42,7	4,66	1,01	3453	84
levitys ja tasaus	TH 14	17,7	1062	312	1,49	4,25	15,9	1,38	1,06	850	87
kastelu	KA	3,3	5,5	9,9	0,095	0,178	0,263	0,016	*	*	84
tiivistys	JK 20	3,3	45	13	0,072	0,225	0,675	0,059	0,045	36,0	92
kastelu	KA	3,3	5,5	9,9	0,095	0,178	0,263	0,016	*	*	84
muotoilu	TH 14	11,4	684	201	0,958	2,74	10,3	0,889	0,684	547	87
tiivistys	JK 20	3,3	45	13	0,072	0,225	0,675	0,059	0,045	36,0	92
Yhteensä		247	15516	6227	31,9	92,6	235	20,3	15,1	14834	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden tuhkatierakenteessa C

Eristyskrs Hiekka	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
irrotus ja kuormaus	KKH 17	36,8	1840	498	2,94	9,20	25,8	2,39	1,84	1362	89
kuljetus 50 km	KA 25	634	6160	11088	86,2	262	339	37,0	8,01	27412	84
levitys	PT 08	29,6	1302	398	2,08	6,51	19,5	1,69	1,30	1081	84
tiivistys	JK 20	4,5	61	18,0	0,098	0,305	0,915	0,079	0,061	48,8	92
tasaus	TH 14	2	120	35,0	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
Yhteensä		707	9483	12040	91,5	278	387	41,3	11,3	30000	

Penger LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		413	22715	-	*	*	1,03	*	0,87	548	*
annostelu sekoittimeen		34,2	5310	-	*	*	0,24	*	0,20	128	*
seoksen valmistus		17,1	1540	-	*	*	0,07	*	0,06	37	*
kuormaus	KA 35	54,9	53	137	1,58	2,96	4,38	0,26	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	127	660	1716	7,92	23,8	57,2	6,6	1,14	3916	84
levitys	PT 08	47,7	2099	642	3,36	10,5	31,5	2,73	2,10	1742	84
tiivistys	JK 20	4,7	63	19	0,101	0,315	0,945	0,082	0,063	50,4	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		288	9845	2549	13,1	38,0	96,1	9,83	3,69	5970	

Jakava krs LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		104	5696	-	*	*	0,26	*	0,22	138	*
annostelu sekoittimeen		8,53	1325	-	*	*	0,06	*	0,05	32	*
seoksen valmistus		4,27	385	-	*	*	0,02	*	0,01	9	*
kuormaus	KA 35	13,7	13	34,3	0,39	0,74	1,09	0,07	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	31,7	165	429	1,98	5,94	14,3	1,65	0,286	979	84
levitys	PT 08	25,2	1109	339	1,77	5,55	16,6	1,44	1,11	920	84
tiivistys	JK 20	8,7	117	34	0,187	0,585	1,76	0,152	0,117	93,6	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		94	3234	871	4,50	13,29	35,66	3,47	1,70	2130	

Kantava krs (alaosa) LT/RPT-seos + 5 % sem.	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		104	5696	-	*	*	0,26	*	0,22	138	*
annostelu sekoittimeen		8,53	1325	-	*	*	0,06	*	0,05	32	*
seoksen valmistus		4,27	385	-	*	*	0,02	*	0,01	9	*
kuormaus	KA 35	13,7	13	34,3	0,39	0,74	1,09	0,07	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	31,7	165	429	1,98	5,94	14,3	1,65	0,286	979	84
levitys	PT 08	25,2	1109	339	1,77	5,55	16,6	1,44	1,11	920	84
tiivistys	JK 20	3,7	50	15	0,080	0,250	0,750	0,065	0,050	40,0	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
sementin valmistus		-	142667	38431	12,5	182	355	37,4	60,5	74880	*
sementin kuljetus	SA 25	2,31	16	29	0,2	0,7	0,9	0,10	0,02	71	84
Yhteensä (kohdat 2-10)		91	145850	39312	17,1	196	391	40,9	62,2	77028	

Kantava krs (yläosa) Murske (<32 mm)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	11,8	413	142	0,66	1,65	4,96	0,413	0,413	330	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	1,59	650	590	-	0,40	0,15	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	5,4	402	118	0,563	1,61	5,63	0,402	0,402	322	90
louheen kuormaus	KKH 25t	13,8	1690	484	2,70	8,45	25,4	2,20	1,69	1251	89
louheen ajo murskaamoon	MA	14,7	2623	807	3,15	10,49	39,35	2,62	2,62	1941	91
murskaus	3-vaihe	14,4	5330	1614	8,53	21,32	63,96	5,33	5,33	4584	100
altakanto kasaan	CAT 980	11,3	1050	317	1,47	4,2	14,7	1,26	1,05	941	84
kuormaus	KKH 17	14,7	735	199	1,18	3,68	10,3	0,956	0,735	544	89
kuljetus 10 km	KA 25	117	776	1397	10,9	33,0	42,7	4,66	1,01	3453	84
levitys ja tasaus	TH 14	17,7	1062	312	1,49	4,25	15,9	1,38	1,06	850	87
kastelu	KA	3,3	5,5	9,9	0,095	0,178	0,263	0,016	*	*	84
tiivistys	JK 20	3,3	45	13	0,072	0,225	0,675	0,059	0,045	36,0	92
kastelu	KA	3,3	5,5	9,9	0,095	0,178	0,263	0,016	*	*	84
muotoilu	TH 14	11,4	684	201	0,958	2,74	10,3	0,889	0,684	547	87
tiivistys	JK 20	3,3	45	13	0,072	0,225	0,675	0,059	0,045	36,0	92
Yhteensä		247	15516	6227	31,9	92,6	235	20,3	15,1	14834	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden kivitierakenteessa 1 (tuhkateiden vertailurakenne)

Penger Louhe (+sora)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	30,2	1058	363	1,69	4,23	12,70	1,058	1,058	846	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	4,1	1662	1511	-	1,018	0,396	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	13,7	1027	302	1,438	4,11	14,38	1,027	1,027	822	90
louheen kuormaus	KKH 25t	48,3	2657	719	4,25	13,3	39,9	3,45	2,66	1966	89
soran kuormaus	KKH 17	16,0	800	235	1,28	4,00	11,2	1,04	0,80	592	89
louheen kuljetus 10 km	KA 25	277	1600	2880	22,4	68	88,0	9,60	2,08	7120	84
soran kuljetus 50 km	KA 25	254	2460	4428	34,4	105	135	14,8	3,20	10947	84
louheen levitys	PT 08	35,8	1575	482	2,52	7,88	23,6	2,05	1,58	1307	84
louheen tiivistys	JT 09	17,5	429	136	0,772	1,716	5,148	0,515	0,429	343,2	92
soran levitys	PT 08	16,1	708	217	1,13	3,54	10,6	0,920	0,708	588	84
soran tiivistys ja tasaus	JT 09	11,1	272	86	0,490	1,088	3,264	0,326	0,272	217,6	92
Yhteensä		724	14248	11359	70,4	213	344	34,7	13,8	24749	

Suodatinkrs Hiekka	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
Irrotus ja kuormaus	KKH 17	36,8	1840	498	2,94	9,20	25,8	2,39	1,84	1362	89
kuljetus 50 km	KA 25	634	6160	11088	86,2	262	339	37,0	8,01	27412	84
levitys	PT 08	29,6	1302	398	2,08	6,51	19,5	1,69	1,30	1081	84
tiivistys	JK 20	4,5	61	18	0,098	0,305	0,915	0,079	0,061	48,8	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,480	1,80	0,156	0,120	96,0	87
Yhteensä		707	9483	12037	91,5	278	387	41,3	11,3	29999	

Jakava krs Sora	Tunnus	Kokonais työaika/ h	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
			kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
kuormaus	KKH 17	48	2400	706	3,84	12,0	33,6	3,12	2,40	1776	89
kuljetus 50 km	KA 25	765	7400	13320	103,6	315	407	44,4	9,62	32930	84
levitys	PT 08	35,5	1562	478	2,50	7,81	23,43	2,03	1,56	1296	84
tiivistys	JT 09	5	123	39	0,221	0,492	1,476	0,148	0,123	98,4	92
tasaus	TH 14	2	120	35	0,168	0,48	1,8	0,156	0,12	96	87
Yhteensä		856	11605	14578	110,3	335	467	49,9	13,8	36197	

Kantava krs Murske (< 32 mm)	Tunnus	Kokonais työaika/ h	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
			kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	11,8	413	142	0,66	1,65	4,96	0,413	0,413	330	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	1,6	650	590	-	0,398	0,155	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	5,36	402	118	0,563	1,61	5,63	0,402	0,402	322	90
louheen kuormaus	KKH 25t	13,8	1690	484	2,70	8,45	25,4	2,20	1,69	1251	89
louheen ajo murskaamoon	MA	14,7	2623	807	3,15	10,5	39,3	2,62	2,62	1941	91
murskaus	3-vaihe	14,4	5330	1614	8,53	21,3	64,0	5,33	5,33	4584	100
altakanto kasaan	CAT 980	11,3	194	58,8	0,272	0,776	2,72	0,233	0,194	174	84
kuormaus	KKH 17	14,7	735	199	1,18	3,68	10,29	0,956	0,735	544	89
kuljetus 10 km	KA 25	117	776	1397	10,9	33,0	42,7	4,66	1,01	3453	84
levitys ja tasaus	TH 14	17,7	1062	312	1,49	4,25	15,93	1,38	1,06	850	87
kastelu	KA	3,3	5,5	9,9	0,095	0,178	0,263	0,016	*	*	84
tiivistys	JK 20	3,3	45	13	0,072	0,225	0,675	0,059	0,045	36	92
kastelu	KA	3,3	5,5	9,9	0,095	0,178	0,263	0,016	*	*	84
muotoilu	TH 14	11,4	684	201	0,958	2,74	10,3	0,889	0,684	547	87
tiivistys	JK 20	3,3	45	13	0,072	0,225	0,675	0,059	0,045	36	92
Yhteensä		247	14660	5968	30,7	89,1	223	19,2	14,2	14067	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt 338 m:n pituista tieosuutta kohden Herttoniemen koetierakenteessa 1

Penger Louhe (+sora)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	4,25	148	50,9	0,24	0,59	1,78	0,148	0,148	118	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	0,57	233	212	-	0,143	0,056	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	1,9	144	42,4	0,202	0,58	2,02	0,144	0,144	115	90
louheen kuormaus	KKH 25t	7,65	421	114	0,67	2,1	6,3	0,55	0,42	312	89
soran kuormaus	KKH 17	3,32	166	49	0,27	0,83	2,3	0,22	0,17	123	89
louheen kuljetus 10 km	KA 25	38,8	224	403	3,1	9,5	12,3	1,34	0,29	997	84
soran kuljetus 50 km	KA 25	52,5	500	900	7,0	21	28	3,0	0,65	2225	84
louheen levitys	PT 08	7,4	326	100	0,52	1,63	4,9	0,42	0,33	271	84
louheen tiivistys	JT 09	3,56	87	28	0,157	0,35	1,04	0,104	0,087	70	92
soran levitys	PT 08	3,34	147	45	0,24	0,74	2,2	0,191	0,147	122	84
soran tiivistys ja tasaus	JT 09	2,25	55	17	0,099	0,22	0,66	0,066	0,055	44	92
Yhteensä		126	2451	1962	12,5	38	61	6,2	2,4	4396	

Jakava krs LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		580	31900	-	*	*	1,45	*	1,22	770	*
annostelu sekoittimeen		46,2	7176	-	*	*	0,33	*	0,28	173	*
seoksen valmistus		23,1	2080	-	*	*	0,09	*	0,08	50	*
kuormaus	KA 35	74,3	186	915	2,14	4,01	5,93	0,36	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	171	891	2317	10,7	32	77	8,9	1,54	5287	84
levitys	PT 08	130	5720	1750	9,2	29	86	7,4	5,7	4748	84
tiivistys	JV 08	5,1	125	40	0,23	0,50	1,50	0,150	0,125	100	92
tasaus	TH 14	0,41	25	7	0,035	0,100	0,38	0,033	0,025	20,0	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		450	16203	5029	22	65	171	16,9	7,8	10378	

Kantava/ jakava krs LT/RPT-seos + 5 % sem.	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		41,8	2298	-	*	*	0,10	*	0,09	55	*
annostelu sekoittimeen		3,47	538	-	*	*	0,02	*	0,02	13	*
seoksen valmistus		1,7	156	-	*	*	0,01	*	0,01	4	*
kuormaus	KA 35	5,57	5	13,9	0,16	0,3	0,44	0,03	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	12,7	66	172	0,792	2,376	5,72	0,66	0,1144	391,6	84
levitys	PT 08	5,2	229	70	0,37	1,15	3,4	0,30	0,23	190	84
tiivistys	JV 08	1,69	41	13	0,074	0,164	0,492	0,049	0,041	32,8	92
tasaus	TH 14	0,41	25	7	0,035	0,100	0,38	0,033	0,025	20,0	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		31	1060	276	1,43	4,1	10,5	1,1	0,4	651	

Kantava krs Murske (< 32 mm)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt: HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	2,4	84	28,8	0,13	0,34	1,01	0,084	0,084	67	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	0,32	132	120	-	0,081	0,031	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	1,1	81,6	24	0,114	0,33	1,14	0,082	0,0816	65	90
louheen kuormaus	KKH 25t	2,8	345	98,5	0,55	1,73	5,2	0,45	0,35	255	89
louheen ajo murskaamoon	MA	3	534	164	0,64	2,1	8,0	0,53	0,53	395	91
murskaus	3-vaihe	2,93	1083	328	1,73	4,3	13,0	1,083	1,083	931	100
altakanto kasaan	CAT 980	2,3	213	64,4	0,298	0,852	2,98	0,256	0,213	191	84
kuormaus	KKH 17	3	150	41	0,24	0,75	2,1	0,195	0,15	111	89
kuljetus 10 km	KA 25	23,5	156	281	2,2	6,6	8,6	0,94	0,20	694	84
levitys ja tasaus	TH 14	3,6	216	64	0,30	0,86	3,2	0,28	0,22	173	87
kastelu	KA	0,68	1,13	2,04	0,02	0,037	0,054	0,003	*	*	84
tiivistys	JK 20	1,35	33	10	0,059	0,132	0,40	0,040	0,033	26,4	92
kastelu	KA	0,68	1,13	2,04	0,02	0,037	0,054	0,003	*	*	84
muotoilu	TH 14	2,32	139	41	0,19	0,56	2,1	0,18	0,139	111	87
tiivistys	JK 20	1,35	33	10	0,059	0,132	0,40	0,040	0,033	26,4	92
Yhteensä		51	3202	1279	6,6	18,9	48	4,2	3,1	3047	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt 338 m:n pituista tieosuutta kohden Herttoniemen koetierakenteessa 2

Penger Louhe (+sora)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	4,25	148	50,9	0,24	0,59	1,78	0,148	0,148	118	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	0,57	233	212	-	0,143	0,056	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	1,9	144	42,4	0,202	0,58	2,02	0,144	0,144	115	90
louheen kuormaus	KKH 25t	7,65	421	114	0,67	2,1	6,3	0,55	0,42	312	89
soran kuormaus	KKH 17	3,32	166	49	0,27	0,83	2,3	0,22	0,17	123	89
louheen kuljetus 10 km	KA 25	38,8	224	403	3,1	9,5	12,3	1,34	0,29	997	84
soran kuljetus 50 km	KA 25	52,5	500	900	7,0	21	28	3,0	0,65	2225	84
louheen levitys	PT 08	7,4	326	100	0,52	1,63	4,9	0,42	0,33	271	84
louheen tiivistys	JT 09	3,56	87	28	0,157	0,35	1,04	0,104	0,087	70	92
soran levitys	PT 08	3,34	147	45	0,24	0,74	2,2	0,191	0,147	122	84
soran tiivistys ja tasaus	JT 09	2,25	55	17	0,099	0,22	0,66	0,066	0,055	44	92
Yhteensä		126	2451	1962	12,5	38	61	6,2	2,4	4396	

Jakava krs LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		580	31900	-	*	*	1,45	*	1,22	770	*
annostelu sekoittimeen		46,2	7176	-	*	*	0,33	*	0,28	173	*
seoksen valmistus		23,1	2080	-	*	*	0,09	*	0,08	50	*
kuormaus	KA 35	74,3	186	915	2,14	4,01	5,93	0,36	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	171	891	2317	10,7	32	77	8,9	1,54	5287	84
levitys	PT 08	130	5720	1750	9,2	29	86	7,4	5,7	4748	84
tiivistys	JV 08	5,1	125	40	0,23	0,50	1,50	0,150	0,125	100	92
tasaus	TH 14	0,41	25	7	0,035	0,100	0,38	0,033	0,025	20,0	87
Yhteensä (kohdat 2-8)		450	16203	5029	22	65	171	16,9	7,8	10378	

Kantava/ jakava krs LT/RPT-seos + 5 % sem.	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		41,8	2298	-	*	*	0,10	*	0,09	55	*
annostelu sekoittimeen		3,47	538	-	*	*	0,02	*	0,02	13	*
seoksen valmistus		1,7	156	-	*	*	0,01	*	0,01	4	*
kuormaus	KA 35	5,57	5	13,9	0,16	0,3	0,44	0,03	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	12,7	66	172	0,792	2,376	5,72	0,66	0,1144	391,6	84
levitys	PT 08	5,2	229	70	0,37	1,15	3,4	0,30	0,23	190	84
tiivistys	JV 08	1,69	41	13	0,074	0,164	0,492	0,049	0,041	32,8	92
tasaus	TH 14	0,41	25	7	0,035	0,100	0,38	0,033	0,025	20,0	87
sementin valmistus			57958	15613	5,07	74,1	144	15,2	24,6	30420	
sementin kuljetus	SA 25	1,15	8	14	0,1	0,3	0,4	0,05	0,01	36	84
Yhteensä (kohdat 2-10)		32	59027	15903	6,61	78,5	155	16,3	25,0	31107	

Kantava krs Murske (< 32 mm)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	2,4	84	28,8	0,13	0,34	1,01	0,084	0,084	67	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	0,32	132	120	-	0,081	0,031	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	1,1	81,6	24	0,114	0,33	1,14	0,082	0,0816	65	90
louheen kuormaus	KKH 25t	2,8	345	98,5	0,55	1,73	5,2	0,45	0,35	255	89
louheen ajo murskaamoon	MA	3	534	164	0,64	2,1	8,0	0,53	0,53	395	91
murskaus	3-vaihe	2,93	1083	328	1,73	4,3	13,0	1,083	1,083	931	100
altakanto kasaan	CAT 980	2,3	213	64,4	0,298	0,852	2,98	0,256	0,213	191	84
kuormaus	KKH 17	3	150	41	0,24	0,75	2,1	0,195	0,15	111	89
kuljetus 10 km	KA 25	23,5	156	281	2,2	6,6	8,6	0,94	0,20	694	84
levitys ja tasaus	TH 14	3,6	216	64	0,30	0,86	3,2	0,28	0,22	173	87
kastelu	KA	0,68	1,13	2,04	0,02	0,037	0,054	0,003	*	*	84
tiivistys	JK 20	1,35	33	10	0,059	0,132	0,40	0,040	0,033	26,4	92
kastelu	KA	0,68	1,13	2,04	0,02	0,037	0,054	0,003	*	*	84
muotoilu	TH 14	2,32	139	41	0,19	0,56	2,1	0,18	0,139	111	87
tiivistys	JK 20	1,35	33	10	0,059	0,132	0,40	0,040	0,033	26,4	92
Yhteensä		51	3202	1279	6,6	18,9	48	4,2	3,1	3047	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt 338 m:n pituista tieosuutta kohden kivitierakenteessa 2 (Herttoniemen koetien vertailurakenne)

Penger Louhe (+sora)	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	50,5	1768	606	2,83	7,07	21,22	1,768	1,768	1414	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	6,8	2778	2525	-	1,702	0,662	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	23,0	1717	505	2,404	6,87	24,04	1,717	1,717	1374	90
louheen kuormaus	KKH 25t	80,7	4439	1201	7,10	22,2	66,6	5,77	4,44	3285	89
soran kuormaus	KKH 17	3,3	166	49	0,27	0,83	2,3	0,22	0,17	123	89
louheen kuljetus 10 km	KA 25	463	2672	4810	37,4	113,6	147,0	16,03	3,47	11890	84
soran kuljetus 50 km	KA 25	52,5	500	900	7,0	21	28	3,0	0,65	2225	84
louheen levitys	PT 08	155	6820	2086	10,91	34,10	102,3	8,87	6,82	5661	84
louheen tiivistys	JT 09	5,1	125	40	0,225	0,5	1,5	0,150	0,125	100	92
soran levitys	PT 08	3,34	147	45	0,24	0,74	2,2	0,191	0,147	122	84
soran tiivistys ja tasaus	JT 09	2,25	55	17	0,099	0,22	0,66	0,066	0,055	44	92
Yhteensä		846	21187	12784	68,5	209	396	37,8	19,4	26238	

Jakava krs Sora	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
Irrotus ja kuormaus	KKH 17	9,76	488	132	0,78	2,44	6,8	0,63	0,488	361	89
kuljetus 50 km	KA 25	155	1500	2700	21,0	64	83	9,0	1,95	6675	84
levitys	PT 08	7,23	318	97	0,51	1,59	4,8	0,41	0,32	264	84
tiivistys	JT 09	1	14	4	0,022	0,070	0,210	0,018	0,014	11,2	92
tasaus	TH 14	0,41	25	7	0,035	0,100	0,38	0,033	0,025	20,0	87
Yhteensä		173	2345	2940	22,3	68	95	10,1	2,8	7331	

Kantava krs Murske (< 32 mm)	Tunnus	Kokonais työaika/ h	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
			kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	2,4	84	28,8	0,13	0,34	1,01	0,084	0,084	67	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	0,3	132	120	-	0,081	0,031	-	-	-	130
rikotus	Rammer 82	1,09	81,6	24	0,114	0,33	1,14	0,082	0,0816	65	90
louheen kuormaus	KKH 25t	2,8	345	98,5	0,55	1,73	5,2	0,45	0,35	255	89
louheen ajo murskaamoon	MA	3	534	164	0,64	2,1	8,0	0,53	0,53	395	91
murskaus	3-vaihe	2,93	1083	328	1,73	4,3	13,0	1,083	1,083	931	100
altakanto kasaan	CAT 980	2,3	213	64,4	0,298	0,852	2,98	0,256	0,213	191	84
kuormaus	KKH 17	3	150	41	0,24	0,75	2,1	0,195	0,15	111	89
kuljetus 10 km	KA 25	23,5	156	281	2,2	6,6	8,6	0,94	0,20	694	84
levitys ja tasaus	TH 14	3,6	216	64	0,30	0,86	3,24	0,28	0,22	173	87
kastelu	KA	0,68	1,13	2,04	0,02	0,037	0,054	0,003	*	*	84
tiivistys	JK 20	0,68	9	3	0,014	0,045	0,135	0,012	0,009	7,2	92
kastelu	KA	0,68	1,13	2,04	0,02	0,037	0,054	0,003	*	*	84
muotoilu	TH 14	2,32	139	41	0,195	0,56	2,1	0,181	0,139	111	87
tiivistys	JK 20	0,68	9	3	0,0144	0,045	0,135	0,012	0,009	7,2	92
Yhteensä		50	3154	1265	6,5	18,8	48	4,1	3,1	3009	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt läjitysaluesijoituksessa sekä täyteaine- ja sementtistabiloinnissa

Läjitysaluesijoitus

Täyttöallas LT/RPT-seos	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		620	34120	-	*	*	1,55	*	1,31	824	*
annostelu sekoittimeen		49,7	7710	-	*	*	0,35	*	0,30	186	*
seoksen valmistus		24,8	2240	-	*	*	0,10	*	0,09	54	*
kuormaus	KA 35	79,9	77	200	2,3	4,31	6,38	0,38	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	185	960	2496	11,52	34,56	83,2	9,6	1,66	5696	84
levitys ja tiivistys	JK 20 P	93,2	1258	385	2,01	6,29	18,9	1,64	1,26	1006	92
Yhteensä (kohdat 2-6)		433	12245	3081	15,8	45,2	109	11,6	3,3	6943	

Louhepenger Louhe	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
Louhinta/ poraus	Tamrock 600 S	18,2	638	219	1,02	2,55	7,66	0,638	0,638	510	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	Portanol/ ANO	2,45	1003	912	-	0,615	0,239	-	-	-	130
Rikotus	Rammer 82	8,3	620	182	0,868	2,48	8,68	0,62	0,62	496	90
Louheen kuormaus	KKH 25 t	15,9	875	201	1,40	4,38	13,1	1,14	0,88	648	89
Louheen kuljetus	KA 25	90,8	524	943	7,3	22,3	28,8	3,14	0,68	2332	84
Louheen levitys	PT 08	20,3	1218	358	1,95	6,09	18,3	1,58	1,22	1011	84
Yhteensä		156	4878	2815	12,57	38,4	76,8	7,12	4,03	4997	

Täyteainestabilointi

Täyteainestabilointi Täyteaine	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
siirto suotimelta siiloon		620	34120	-	*	*	1,55	*	1,31	824	*
annostelu sekoittimeen		49,7	7710	-	*	*	0,35	*	0,30	186	*
seoksen valmistus		24,8	2240	-	*	*	0,10	*	0,09	54	*
kuormaus	KA 35	79,9	77	200	2,3	4,31	6,38	0,38	*	*	*
kuljetus 10 km	KA 35	185	960	2496	11,52	34,56	83,2	9,6	1,66	5696	84
sekoitus ja tiivistys	KKH 25 t	314	17270	3972	27,63	86,35	259,1	22,45	17,27	12780	89
Yhteensä (kohdat 2-6)		653	28257	6668	41,5	125,2	349	32,4	19,3	18716	

Sementtistabilointi

Sementtistabilointi Sementti	Tunnus	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
Sementin valmistus		*	1107153	298243	96,9	1416	2757	291	469	581100	*
Sementin kuljetus	SA 25	17,3	120	216	1,7	5,1	6,6	0,72	0,16	534	84
Levitys	TR 55+	284	3905	1149	5,86	15,6	58,6	5,86	3,91	3046	84
Sekoitus	TR 55+	284	3905	5743	5,86	15,6	58,6	5,86	3,91	3046	84
Tiivistys	JT 09	56,9	1394	443	2,51	5,58	16,7	1,67	1,39	1115	92
Yhteensä			1116477	305794	113	1457	2897	305	479	588841	

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden eriteltynä rakennekerroksittain

Tuhkatie AB	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Eristys	91,5	278	387	41,3	11,3	30000	12040	9483
Penger	13,1	38	96,1	9,83	3,69	5970	2550	9845
Jakava	4,5	13,3	35,7	3,47	1,7	2130	871	3234
Kantava(ala)	4,39	13	34,7	3,4	1,6	2077	852	3167
Kantava(ylä)	31,9	92,6	235	20,3	15,1	14800	6230	15516
Yht.	145	435	789	78,3	33,4	54977	22543	41245
Tuhkatie C	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Eristys	91,5	278	387	41,3	11,3	30000	12040	9483
Penger	13,1	38,0	96,1	9,83	3,69	5970	2549	9845
Jakava	4,50	13,29	35,66	3,47	1,70	2130	871	3234
Kantava(ala)	17,1	196	391	40,9	62,2	77028	39312	145850
Kantava(ylä)	32	92,6	235	20,3	15,1	14834	6227	15516
Yht.	158	618	1144	116	94,0	129962	60999	183928
Kivitie 1	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	70,4	213	344	34,7	13,8	24749	11359	14248
Suodatin	91,5	278	387	41,3	11,3	29999	12037	9483
Jakava	110,3	335	467	49,9	13,8	36197	14578	11605
Kantava	30,7	89,1	223	19,2	14,2	14067	5968	14660
Yht.	303	916	1422	145	53,2	105012	43942	49996
Koetie 1	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	12,5	37,9	61,1	6,2	2,4	4396	1962	2451
Jakava	22,2	65,3	171	16,9	7,8	10378	5029	16203
Kk/jk	1,4	4,1	10,5	1,1	0,4	651	276	1060
Kantava	6,6	18,9	48,2	4,2	3,1	3047	1279	3202
Yht.	43	126	291	28	13,76	18472	8544	22916
Koetie 2	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	12,5	38	61	6,2	2,4	4396	1962	2451
Jakava	22	65	171	16,9	7,8	10378	5029	16203
Kk/jk	6,6	79	155	16,3	25	31107	15903	59027
Kantava	6,6	18,9	48	4,2	3,1	3047	1279	3202
Yht.	48	201	436	44	38	48928	24171	80883
Kivitie 2	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	68,5	209	396	37,8	19,4	26238	12784	21187
Jakava	22,3	68	95	10,1	2,8	7331	2940	2345
Kantava	6,5	18,8	48	4,1	3,1	3009	1265	3154
Yht.	97	296	538	52	25,2	36578	16988	26685,87
Läjitys	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Täyttö	15,8	45,2	109	11,6	3,3	6943	3080	12245
Louhepenger	12,6	38,4	76,8	7,1	4	4997	2820	4878
Yht.	28,4	83,6	186	18,7	7,3	11940	5900	17123
Stabilointi	HC kg/km	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Täyteaine	41,5	125	349	32,4	19,3	18710	6670	28260
Sementti	113	1457	2897	305	479	588841	305794	1116477

Työkoneiden käyttöajat, energian- ja polttoaineen kulutukset sekä päästöt eriteltynä työvaiheittain

	Tehty työ	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	**Päästöt:** HC	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	pöly
		h/km	kWh/km	l/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km
Tuhkatie AB	Esikäsittely ja kuormaus	284	25082	4975	23	65	197	16	14	11522	5318
	Kuljetukset	941	7926	15059	109	330	467	52	11	36739	1202
	Tienrakennus	200	8237	2503	13	39	124	11	8	6749	
yht.		1425	41245	22536	145	435	788	78	33	55010	6519
Tuhkatie C	Esikäsittely ja kuormaus	284	167749	43406	36	247	552	53	75	86402	5318
	Kuljetukset	944	7942	15088	109	331	468	52	11	36810	1202
	Tienrakennus	200	8237	2503	13	39	124	11	8	6749	
yht.		1427	183928	60996	158	618	1144	116	94	129961	6520
Kivitie 1	Esikäsittely ja kuormaus	285	23481	8347	33	96	290	24	21	16509	5954
	Kuljetukset	2047	18396	33113	258	782	1012	110	24	81862	2997
	Tienrakennus	201	8119	2483	13	38	120	10	8	6641	
yht.		2533	49996	43942	303	916	1422	145	53	105012	8951
Kivitie 1 + läjitys	Esikäsittely ja kuormaus	484	36644	10061	38	111	327	27	24	18403	6073
	Kuljetukset	2323	19880	36552	276	839	1124	123	26	89890	3075
	Tienrakennus	315	10595	3226	17	50	157	14	11	8658	
yht.		3122	67119	49839	331	1000	1607	164	61	116951	9148
Herttoniemen koetie 1	Esikäsittely ja kuormaus	190	13876	2266	7	19	53	4	4	2924	5499
	Kuljetukset	299	1837	4072	24	72	131	15	3	9594	162
	Tienrakennus	169	7203	2206	12	35	107	9	7	5953	
yht.		658	22916	8544	43	126	291	28	14	18472	5661
Herttoniemen koetie 2	Esikäsittely ja kuormaus	190	71834	17879	12	93	197	19	28	33344	5499
	Kuljetukset	300	1845	4087	24	72	132	15	3	9630	162
	Tienrakennus	169	7203	2206	12	35	107	9	7	5953	
yht.		659	80883	24171	48	201	436	44	38	48928	5661
Kivitie 2	Esikäsittely ja kuormaus	192	13979	5887	16	52	155	13	11	8573	5731
	Kuljetukset	694	4828	8690	68	205	266	29	6	21485	486
	Tienrakennus	183	7879	2411	13	39	118	10	8	6520	
yht.		1069	26686	16988	97	296	538	52	25	36578	6217
Läjitys	Esikäsittely ja kuormaus	199	13163	1714	6	14	37	3	3	1894	119
	Kuljetukset	276	1484	3439	19	57	112	13	2	8028	78
	Täyttö	114	2476	743	4	12	37	3	2	2017	
yht.		589	17123	5896	28	84	186	19	7	11939	197
Kivitie2 + läjitys	Esikäsittely ja kuormaus	391	27142	7601	22	66	192	16	14	10467	5850
	Kuljetukset	970	6312	12130	86	262	378	42	9	29512	564
	Täyttö	296	10355	3154	17	51	155	13	10	8537	
yht.		1657	43809	22884	125	379	724	71	33	48517	6414
Täyteainestabilointi	Esikäsittely ja kuormaus	154	10027	200	2	4	7	0,4	0,4	240	22
	Kuljetukset	185	960	2496	12	35	83	10	2	5696	55
	Stabilointi	314	17270	3972	28	86	259	22	17	12780	95,2
yht.		653	28257	6668	41	125	349	32	19	18716	173
Sementtistabilointi	Esikäsittely ja kuormaus	*	1107153	298243	97	1416	2757	291	469	581100	*
	Kuljetukset	22	120	216	2	5	7	1	0,2	534	5
	Stabilointi	625	9204	7335	14	37	134	13	9	7207	
yht.		646	1116477	305794	113	1457	2897	305	479	588841	

Meluajat rakennekerroksittain eri vaihtoehdoissa

Tuhkatie AB	Meluaika dBA*h
Eristyskrs	59606
Penger	15281
Jakava krs	5754
Kantava krs (alaosa)	5294
Kantava krs (yläosa)	21657
Yhteensä	107592

TuhkatieC	Meluaika dBA*h
Eristyskrs	59606
Penger	15281
Jakava krs	5754
Kantava krs (alaosa)	5488
Kantava krs (yläosa)	21657
Yhteensä	107786

Kivitie1	Meluaika dBA*h
Penger	62098
Suodatinkrs	59606
Jakava krs	72148
Kantava krs	21653
Yhteensä	215505

Läjitys	Meluaika dBA*h
Täyttöallas	24114
Louhepenger	13633
Yhteensä	37747

Kivitie1+läjitys	Meluaika dBA*h
Yhteensä	253252

Herttoniemen koetie1	Meluaika dBA*h
Penger	10755
Jakava krs	25789
Kantava/ jakava krs	1695
Kantava krs	4507
Yhteensä	42746

Herttoniemen koetie2	Meluaika dBA*h
Penger	10755
Jakava krs	25789
Kantava/ jakava krs	1791
Kantava krs	4507
Yhteensä	42842

Kivitie2	Meluaika dBA*h
Penger	72759
Jakava krs	14624
Kantava krs	4384
Yhteensä	91767

Kivitie2+läjitys	Meluaika dBA*h
Yhteensä	129514

Täyteainestabilointi	Meluaika dBA*h
	43486

Sementtistabilointi	Meluaika dBA*h
Yhteensä	54400

Tien päällystämisen, kunnossapidon ja korjausten ympäristökuormitukset 50 vuoden aikana (Häkkinen & Mäkelä 1996, s. 31)

	Päällystys*	Kunnossapitostrategia A (suomalainen käytäntö)	Kunnossapitostrategia B (ruotsalainen käytäntö)
Päästöt (kg/km)			
CO2	5000	24 000	27 000
SO2	5,2	2,9	5,8
NOx	26	100	120
CO	6,8	14	18
VOC, kok.**	6,8	150	150
CH4	5,1	150	150
PAH	0,0035	0,0042	0,0061
Bentseeni	0,089	0,11	0,16
Raskasmetallit, kok.	0,0015	0,00071	0,0015
As	0,00013	61×10^{-6}	0,00013
Hg	$1,9 \times 10^{-6}$	$0,92 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$
Cd	19×10^{-6}	$9,2 \times 10^{-6}$	19×10^{-6}
Cr	63×10^{-6}	31×10^{-6}	64×10^{-6}
Pb	0,0013	0,00061	0,0013
Pöly	8,1	4,7	9,1
Energia (GJ/km)			
Fossiiliset polttoaineet	69	470	510
Sähkö			

* Laskettu päällystyksen aikaisen polttoaineen kulutuksen perusteella

**VOC-päästöt on laskettu energian kulutuksen perusteella. Bitumin käytöstä aiheutuvat VOC-päästöt päällystyksen aikana eivät sisälly tarkasteluun.

Published by

Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN–02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 4561
Fax + 358 9 456 4374

Series title, number and report code of publication
VTT Tiedotteita 1898 VTT–TIED–1898

Date
May 1998

Project number
K5SU00492

Author(s)

Eskola, Paula & Mroueh, Ulla-Maija

Name of project
Energiantuotannon ja teollisuuden sivutuotteiden hyötykäytön vaikutusten arviointi

Commissioned by
Lohja Rudus Oy Ab

Title

Environmental impact of the use of fly ash and FGD residues in earthworks

Abstract

The goal of this project was to assess the environmental impact of using fly ash and flue gas desulphurization (FGD) residues (produced by pulverized coal-fired power plants which employ semi dry scrubbing technology) in earthworks. The use of fly ash and FGD residues was compared with the use of natural minerals (sand, gravel and macadam) in road construction and clay stabilization. When natural minerals were used, the fly ash and FGD residues were assumed to be disposed of in a landfill. The study was conducted according to the life cycle assessment (LCA) method recommended by SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry).

The assessment includes the following environmental effects caused by extraction, production and transportation of raw materials and the road construction process: energy and fuel consumption, consumption of raw materials, emissions into air, leaching of impurities, noise, dust emissions, land use and accident risks. The environmental impacts were assessed for a 1 km long road over a period of 50 years. The contribution from road traffic over the same period is not included in the study. The maintenance of the road was also excluded. It was assumed that the road would remain in place also after the studied period.

The compared options where:

1. a road built of fly ash and FGD residues
2. a road built of natural minerals, and disposal of fly ash and FGD residues in a landfill
3. stabilization of clay with fly ash and FGD residues
4. stabilization of clay with cement

On the basis of the study most of the environmental impacts of a road built of natural minerals (option 1) were higher than those of the road built of fly ash and FGD residue (option 2). Only the leached out impurities were higher in option 2. In the road built of natural minerals the higher emissions into air are mainly due to the transportation of sand and gravel over long distances.

In clay stabilization the environmental impacts of the two options differed significantly. The environmental impacts of cement stabilization were many times higher than those of the stabilization with fly ash and FGD residue. The difference was mainly due to the environmental impacts of cement production, which are very high.

This study describes the situation in the Helsinki metropolitan area and the results are therefore regional. Elsewhere, where sand and gravel are more readily available, the results of the study could be different. Also, other definitions made during the study may have had significant effects on the results.

Activity unit
VTT Chemical Technology, Environmental Technology,
Betonimiehenkuja 5, P.O.Box 1403, FIN–02044 VTT, Finland

ISSN and series title
VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES 1235–0605 (soft back edition) 1455–0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)

ISBN
951–38–5288–1 (soft back edition)
951–38–5289–X (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)

Language
Finnish, Engl. abstr.

Class (UDC)
625.7/.8:504.05

Keywords
earthwork, road construction, fly ash, combustion products, environmental effects

Sold by VTT Information Service
P.O.Box 2000, FIN–02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374

Pages
82 p. + app. 11 p.

Price group
B

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

VTT KEMIANTEKNIIKKA – VTT KEMITEKNIK –
VTT CHEMICAL TECHNOLOGY

1712 Carlsson, Torbjörn & Aalto, Hannu. Coprecipitation of Ni with $CaCO_3$. An experimental study. 1995. 24 p.

1714 Muurinen, Arto, Aalto, Hannu, Carlsson, Torbjörn, Lehikoinen, Jarmo, Melamed, Avner, Olin, Markus, Salonen, Pentti. Interaction of fresh and saline waters with compacted bentonite. 1995. 29 p. + app. 14 p.

1743 Tormonen, Kauko & Roos, Aappo. Ammoniakin ja vetykloridin määrittäminen kenttäkäyttöisellä FT-IR-analysaattorilla. 1996. 40 s.

1744 Savolainen, Ilkka, Tähtinen, Markus, Wistbacka, Magnus, Pipatti, Riitta & Lehtilä, Antti. Happamoittavan laskeuman taloudellinen rajoittaminen vähentämällä päästöjä Suomessa, Virossa ja Venäjällä. 1996. 60 s.

1761 Seppälä, Risto & Lampinen, Jarkko. Haittaverojen ohjausvaikutus voimalaitosten käyttöön ja kannattavuuteen case-kohteissa. 1996. 69 s. + liitt. 40 s.

1769 Palanterä, Risto. Jätepaperin polton ympäristövaikutukset systeemiratkaisuna. 1996. 52 s.

1775 Mäkelä, Timo & Albers, Martin. Amperometric biosensors for detection of choline and lactate by Choline Oxidase and Lactate Oxidase immobilisation in microporous membranes. 1996. 39 p.

1776 Rasilainen, Kari, Hellmuth, Karl-Heinz, Kivekäs, Liisa, Melamed, Avner, Ruskeeniemi, Timo, Siitari-Kauppi, Marja, Timonen, Jussi & Valkiainen, Matti. An interlaboratory comparison of methods for measuring rock matrix porosity. 1996. 16 p. + app. 26 p.

1779 Leminen, Anja, Johansson, Allan, Lindholm, Johan, Gullichsen, Johan & Yilmaz, Yakub. Non-wood fibres in papermaking. Literature review. 1996. 34 p.

1788 Valkiainen, Matti, Aalto, Hannu, Lehikoinen, Jarmo & Uusheimo, Kari. The effect of thickness in the through-diffusion experiment. Final report. 1996. 30 p. + app. 3 p.

1793 Carlsson, Torbjörn & Aalto, Hannu. Interactions of Ni and Ca at the calcite-solution interface. 1996. 22 p.

1799 Aunela-Tapola, Leena, Jormanainen, Pauli, Laukkarinen, Anja, Mehtonen, Arvo, Puustinen, Harri, Salmikangas, Tuomo, Tolvanen, Merja & Vahlman, Tuula. Päästömittausten laadunvarmistus. Päästöjen määrityksen epävarmuuteen vaikuttavat tekijät. 1996. 66 s. + liitt. 6 s.

1801 Wahlström, Margareta & Laine-Ylijoki, Jutta. Standardoidut liukoisuustestimenetelmät maarakentamisessa hyötykäytettävien materiaalien ympäristötestauksessa. 1996. 44 s. + liitt. 16 s.

1802 Klobut, Krzysztof, Siltanen, Torsti, Vihersalo, Kari & Virkki, Jorma. Matalaenergiapientalon öljylämmityksen kehittäminen. 1996. 52 s. + liitt. 53 s.

1803 Järvelä, Pirkko, Järvelä, Pentti & Tervala, Outi. Puulevyjen kestomuovipinnoitteet, muovien modifiointi ja ominaisuudet. 1996. 32 s. + liitt. 3 s.

1806 Muurinen, Arto, Lehikoinen, Jarmo, Melamed, Avner & Pitkänen, Petteri. Chemical interaction of fresh and saline waters with compacted bentonite. 1996. 26 p. + app. 3 p.

1836 Häkkinen, Tarja, Vares, Sirje, Vesikari, Erkki, Saarela, Kristina, Tattari, Kai & Säteri, Jorma. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden ympäristövaikutukset ja niiden arviointiperusteet. 1997. 138 s. + liitt. 10 s.

1838 Leino, Pentti, Kosunen, Pertti & Rauhamäki, Janne. Energiaverojen vaikutus polttoainevalintoihin ja päästöihin. 1997. 94 s. + liitt. 1 s.

1852 Wahlström, Margareta & Laine-Ylijoki, Jutta. Ympäristötekijät ja niiden tutkiminen maarakentamisessa hyötykäytettävien materiaalien liukoisuustutkimuksissa. 1997. 78 s. + liitt. 12 s.

1857 Heiskanen, Eva, Heininen, Marke, af Heurlin, Elli, Lovio, Raimo, Pänkäläinen, Mervi & Tulenheimo, Virve. Energiayhtiöiden ympäristölaskenta ja -raportointi. 1997. 148 s.

1898 Eskola, Paula & Mroueh, Ulla-Maija. Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi. 1998. 82 s. + liitt. 11 s.

Kivihiilivoimalan sivutuotteina syntyvän lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen hyötykäytön lisäämisen edellytyksenä on hyötykäytön ympäristövaikutusten tunteminen. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen maarakennuskäytön elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset ja verrata niitä sivutuotteiden käytön vaihtoehtona olevan perinteisten kiviainesten käytön vaikutuksiin. Lisäksi oletettiin, että luonnonraaka-aineita käytettäessä sivutuotteet sijoitetaan läjitysalueelle, mikä on maarakennuskäytön todennäköisin vaihtoehto. Tarkastellut hyötykäyttökohteet olivat tierakenne ja ylijäämäsaven stabilointi. Saven stabiloinnissa verrattiin lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksen ja sementin käyttöä saven stabiloinnissa. Elinkaariarvoinnin perusteella luonnonraaka-aineista valmistetun tien aiheuttamat ympäristökuormitukset olivat suuremmat kuin vastaavat kuormitukset lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävällä tiellä. Ainoastaan päästöt maaperään olivat suurempia sivutuotteita sisältävässä vaihtoehdossa. Stabilointikohteissa sementtistabilointi osoittautui ympäristölle selvästi haitallisemmaksi. Tämä johtui sementin valmistuksen aiheuttamista kuormituksista. Tämä elinkaariarviointi tehtiin kuvaamaan tilannetta pääkaupunkiseudulla ja on siten aluekohtainen.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU PL 2000 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	VTT INFORMATIONSTJÄNST PB 2000 02044 VTT Tel. (09) 456 4404 Fax (09) 456 4374	VTT INFORMATION SERVICE P.O.Box 2000 FIN–02044 VTT, Finland Phone internat. + 358 9 456 4404 Fax + 358 9 456 4374

ISBN 951–38–5288–1 (nid.)
ISSN 1235–0605 (nid.)
ISBN 951–38–5289–X (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)
ISSN 1455–0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)

UDK 625.7/.8:504.05