

Maarakentamisen elinkaariarviointi

Paula Eskola & Ulla-Maija Mroueh

VTT Kemiantekniikka

Markku Juvankoski & Antti Ruotoistenmäki

VTT Yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5446-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5447-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

VTT Yhdyskuntatekniikka, Väylät ja ympäristö, Lämpömiehenkuja 2, PL 19031, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 463 251

VTT Samhällsbyggnad och infrastruktur, Infrastruktur och miljö, Värmemansgränden 2, PB 19031, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 463 251

VTT Communities and Infrastructure, Infrastructure and Environment,
Lämpömiehenkuja 2, P.O.Box 19031, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 463 251

Toimitus Leena Ukoski

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Eskola, Paula, Mroueh, Ulla-Maija, Juvankoski, Markku & Ruotoistenmäki, Antti. Maarakentamisen elinkaariarviointi [Life cycle analysis of road and earth construction]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1962. 111 s. + liitt. 16 s.

Avainsanat earthwork, road construction, civil engineering, life cycle analysis, environmental effects

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda selkeä ja toimiva menettelytapa maa- ja tierakenteiden elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointiin ja rakenne-vaihtoehtojen vertailuun. Arviointimenettelyn toivottiin olevan mahdollisimman yksinkertainen ja helpokäyttöinen, mutta kaikki elinkaaren vaiheet ja merkittävät ympäristövaikutukset kattava. Lisäksi olisi pystyttävä ottamaan huomioon tie- ja maarakenteiden erityispiirteet. Arviointi olisi tarvittaessa voitava tehdä osana tien suunnittelua, jolloin sen tuloksia voitaisiin käyttää yhtenä rakenne- tai materiaalivaihtoehtojen valintaperusteena.

Tutkimus on osa laajempaa tutkimuskokonaisuutta, jonka päätavoitteena on laatia opas siitä, miten teollisuuden sivutuotteiden ympäristökelpoisuus ja tekninen toimivuus olisi osoitettava lupa- ja tuoteistamismenettelyssä. Siksi tutkimuksessa keskitytään erityisesti sivutuotteiden ja perinteisten materiaalien vertailuun tierakennuskäytössä.

Tutkimuksessa laadittu ehdotus arviointitavaksi sisältää mm. tavoitteiden ja rajausten määrittelyn, luettelon arvioinnin lähtö- ja tulostiedoista, suosituksen laskentamenettelystä ja alustavan esityksen tulosten merkitysten arvioinnista. Tien pohja- ja päällysrakenteita käsitellään erillisinä ja tulokset liitetään tarvittaessa yhteen. Teollisuuden sivutuotteille arviointiin lisäksi tierakentamisen vaihtoehtona olevan läjitysalue-sijoituksen ympäristövaikutukset.

Tarkasteltavat ympäristökuormitukset ovat raaka-aineiden käyttö, energian ja polttoaineiden käyttö, hiilidioksidi-, typpioksidi-, rikkidioksidi-, VOC-, hiilimonoksidi- ja hiukaspäästöt ilmaan, maaperään liukenevat päästöt, inertti jäte, melu ja maan käyttö. Veden käyttö, tavanomaisen ja ongelmajätteen määrät, typpi- ja COD-päästöt vesiin ja onnettomuusriskit olivat myös mukana tarkasteluissa, mutta ne todettiin niin vähän merkittäviksi tai hankalasti arvioitaviksi, että ne päätettiin jatkossa jättää pois laskennasta.

Laskentatavan soveltuvuuden arvioimiseksi tarkasteltiin esimerkkeinä kivihiilituhkan, betonimurskeen ja masuunikuonan tierakennuskäyttöä, joita verrattiin luonnonmateriaalien käyttöön vastaavissa kohteissa. Näiden esimerkkitarkastelujen tulokset ja alustava arvio ympäristökuormitusten merkityksestä esitetään raportissa. Esimerkkien yhteydessä luotiin tärkeimpien rakennusmateriaalien ja työvaiheiden ympäristökuormitustiedot ja näiden laskennassa tarvittavan aineiston sisältävät perustiedot. Menettelytapaehdotuksen pohjalta luodaan jatkossa jo kerätyn aineiston yhdistävä laskentamalli.

Eskola, Paula, Mroueh, Ulla-Maija, Juvankoski, Markku & Ruotoistenmäki, Antti. Maarakentamisen elinkaariarviointi [Life cycle analysis of road and earth construction]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1962. 111 p. + app. 16 p.

Keywords earthwork, road construction, civil engineering, life cycle analysis, environmental effects

Abstract

The goal of the project was to develop a well-defined and functional life-cycle impact assessment procedure for the comparison and evaluation of alternative road and earth constructions. The following basic requirements were set for the procedure: The method must be straightforward and easy to use, but at the same time all the major unit processes and environmental burdens must be included. In addition, particular attention should be paid to the special characteristics of earth construction. One premise was that the assessment methodology should be applicable as a part of road planning, and that the results could be used as selection criteria for alternative constructions and materials.

The study is a part of an extensive research project, the main objective of which is to provide guidance on the issues involved in evaluating the environmental and technical acceptability of industrial by-products during permit and product development processes. The main focus of the study is therefore on the comparison of industrial by-products and conventional, natural materials used in road construction.

The proposal for the assessment procedure includes the definition of objectives, the scope and system boundaries of the studies, input and output data of the inventory, the recommended inventory methodology and a preliminary proposal for valuation of the inventory results, etc. The roadbase and pavement structures are analysed separately and combined if required. For industrial by-products the environmental burdens of the landfill disposal were also assessed, as an alternative to their use in road construction.

The following environmental burdens are included in the inventory: the use of natural raw materials and industrial by-products; energy and fuel consumption; emissions of carbon dioxide, nitrogen oxides, sulphur dioxide, VOC, carbon monoxide and particles; compounds leaching into the ground; inert waste; noise and land use. Water usage, non-hazardous and hazardous waste, COD- and nitrogen effluents, and accident risks were also included into the inventory during the first phase. It was, however, concluded that either the significance of these burdens is low or the data available is insufficient for their analysis.

To assess the applicability of the inventory method, several case studies were made. In these the use of fly ash, blast-furnace slag and crushed concrete waste in road constructions was compared to the use of natural mineral materials in comparable constructions. The results of these case studies as well as a preliminary valuation of environmental impacts are presented in the report.

In connection with the case studies a data base containing the environmental burdens of the most significant construction materials and unit operations and the information required for the calculation of the data was constructed. During the second phase of the project a calculation model based on the proposed methodology and linking the collected data is formulated.

Alkusanat

Tutkimus "Maarakentamisen elinkaariarviointi" kuuluu osana Tekesin ympäristögeotekniikkaohjelman tutkimuskokonaisuuteen "Sivutuotteet maa- ja tierakenteissa – käyttökelpoisuuden osoittaminen". Tavoitteena oli laatia suositus maarakenteiden elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointi- ja vertailumenettelyksi ja kokeilla menettelyn soveltuvuutta esimerkkitarkasteluissa. Tutkimuksen tuottamaa ympäristötietoa hyödynnetään myös tielaitoksen TPPT-ohjelman projektissa, jonka tavoitteena on luoda menetelmä tierakenteiden elinkaarikustannusten arviointiin.

Tutkimusta rahoittivat Tekesin lisäksi tielaitos, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy, SKJ Oy, VTT Kemianteekniikka ja VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Aarno Valkeisenmäki, Tielaitos, puheenjohtaja
Ari Huomo, Tielaitos
Lauri Kivekäs, Lohja Rudus Oy Ab Ympäristöteknologia
Marko Mäkikyrö, SKJ-yhtiöt Oy
Antti Ruotoistenmäki, VTT Yhdyskuntatekniikka
Veli-Matti Uotinen, tielaitos
Esa Mäkelä, VTT Kemianteekniikka

Hankkeen johtoryhmänä toimi lisäksi projektin "Sivutuotteet maa- ja tierakenteissa – käyttökelpoisuuden osoittaminen" johtoryhmä, johon kuuluivat seuraavat henkilöt:

Aarno Valkeisenmäki, tielaitos, puheenjohtaja
Matts Finnlund, Uudenmaan ympäristökeskus
Osmo Koskisto, Tekes
Kauko Kujala, Oulun Yliopisto
Mikko Leppänen, Viatek-yhtiöt
Ari Seppänen, ympäristöministeriö
Esa Mäkelä, VTT Kemianteekniikka.

Tutkimuksen projektipäällikkönä toimi erikoistutkija Ulla-Maija Mroueh, VTT Kemianteekniikka. Tutkimusryhmässä olivat mukana tutkija Paula Eskola, VTT Kemianteekniikka, tutkija Markku Juvankoski, VTT Yhdyskuntatekniikka ja tutkija Antti Ruotoistenmäki, VTT Yhdyskuntatekniikka. Raportin kohdat 1 - 3 ja 6 - 10 ovat kirjoittaneet Paula Eskola ja Ulla-Maija Mroueh, kohdat 4.1 - 4.3 ja 5.1 - 5.2 Markku Juvankoski ja kohdat 4.4 - 4.5 ja 5.3 Antti Ruotoistenmäki.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	6
SYMBOLILUETTELO	10
1. JOHDANTO	11
2. ELINKAARIARVIOINTI	13
2.1 Arvioinnin toteutus	13
3. KOKEMUKSET RAKENTEIDEN ELINKAARIARVIOINNISTA	15
3.1 Tie- ja maarakenteiden elinkaariarviointi	15
3.1.1 Tilanne Suomessa ja muissa maissa	15
3.1.2 Tehtyjen arviointien toteutustapa ja tulokset	16
3.2 Yleiset rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointimenetelmät	19
4. TIE- JA MAARAKENTEIDEN MATERIAALIT	22
4.1 Tierakenteen perusmalli	22
4.1.1 Rakenneosien toiminta	23
4.2 Perinteiset tie- ja maarakennusmateriaalit	26
4.2.1 Perinteisten materiaalien käyttö rakennekerroksissa	27
4.3 Tie- ja maarakenteisiin soveltuvat uusiomateriaalit	29
4.3.1 Energiantuotannon sivutuotteet	32
4.3.2 Metallurginen teollisuus	33
4.3.3 Kemiallinen ja mekaaninen metsäteollisuus	34
4.3.4 Kaivos- ja valimoteollisuus	35
4.3.5 Rakennustoiminta	35
4.3.6 Tie- ja maarakennustoiminta	36
4.3.7 Yhdyskuntajäte	37
4.3.8 Saastuneet maamateriaalit	38
4.4 Kunnossapitotarpeen arviointi	38
4.5 Rakenteen kierrätettävyys ja jäännösarvo	40
5. ESIMERKKIRAKENTEET	41
5.1 Päälysrakennevaihtoehdot	41
5.2 Pohjarakennevaihtoehdot	48
5.3 Esimerkkirakenteiden kunnossapitotarpeen ja jäännösarvon arviointi	50

6.	TARKASTELUN RAJAUKSET	52
6.1	Toiminnallinen yksikkö	52
6.2	Tarkastelu-aika	52
6.3	Tarkasteltavat työvaiheet	52
6.4	Tarkasteltavat ympäristökuormitukset	52
6.5	Tarkastelun alueellinen laajuus	53
6.6	Sivutuotteet	53
6.7	Luonnon raaka-aineet	53
6.8	Massat ja tilavuudet	54
6.9	Läjitys	54
6.10	Käytetyt koneet ja laitteet	54
6.11	Kuljetukset	55
6.12	Tien käyttö	55
6.13	Tiedon laatu	56
7.	YMPÄRISTÖKUORMITUKSET JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	58
7.1	Raaka-aineiden kulutus	58
7.1.1	Päällysrakennevaihtoehdot	58
7.1.2	Läjitysaluesijoitus	61
7.1.3	Pohjarakennevaihtoehdot	62
7.1.4	Yhteenveto raaka-aineiden kulutuksesta	63
7.2	Energian ja polttoaineiden kulutus	64
7.3	Päästöt ilmaan	67
7.3.1	Pakokaasupäästöt	67
7.3.2	Pölypäästöt	69
7.4	Vaikutukset pohjaveteen	72
7.4.1	Sivutuotteista maaperään liukenevat aineet	72
7.5	Melu	76
7.6	Tien kunnossapidosta aiheutuvat kuormitukset	78
7.7	Maan käyttö	79
7.8	Onnettomuusriskit	80
8.	YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI	81
8.1	Ympäristökuormitustietojen saatavuus ja luotettavuus	81
8.2	Tulosten epävarmuudet	83
8.3	Vaihtoehtojen ympäristökuormitusten vertailu	85
8.4	Ympäristökuormitusten merkittävyyden arviointi	91
8.4.1	Arviointimenetelmät	92
8.4.2	Menetelmien soveltuvuus tierakenteiden vertailuun	92
8.4.3	Ympäristökuormitusten vertailu asiantuntija-arvioiden perusteella	93
8.4.4	Esimerkkirakenteiden vertailu	96

9. SUOSITUKSET ARVIOINTIMENETTELYSTÄ.....	99
9.1 Lähtökohdat	99
9.2 Tavoite	99
9.3 Rajaukset.....	100
9.3.1 Tarkasteltavat toiminnot ja työvaiheet	100
9.3.2 Tarkasteltavat ympäristökuormitukset	102
9.3.3 Muut rajaukset.....	104
9.4 Toteutus ja lähtötiedot	104
LÄHDELUETTELO.....	107

LIITTEET

Symboliluettelo

AB	Asfaltti(betoni)
ANO	Ammoniumnitraatti
BM1	Betonimurskerakenne 1
BM1L	Betonimurskerakenteen BM1 läjitysvaihtoehto
BM2	Betonimurskerakenne 2
BM2L	Betonimurskerakenteen BM2 läjitysvaihtoehto
BST	Bitumisora
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
Hiukk.	Hiukkaset
KVL	Keskimääräinen vuorokausiliikenne
L/S-suhde	Nesteen ja kiinteän aineen suhde
LT1	Lentotuhkarakenne 1
LT1L	Lentotuhkarakenteen LT1 läjitysvaihtoehto
LT2	Lentotuhkarakenne 2
LT2L	Lentotuhkarakenteen LT2 läjitysvaihtoehto
LT3	Lentotuhkarakenne 3 (sementitön rakenne)
MK	Masuunikuonarakenne
NO _x	Typen oksidit
Part.	Hiukkaset
SO ₂	Rikkidioksidi
TPPT	Tien pohja- ja päällysrakenteet - tutkimusohjelma (tielaitos)
V1	Vertailurakenne (luonnonkiviaineksista tehty rakenne)
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (sisältävät hiilivedyt)
YSE	Yleissementti

1. Johdanto

Sekä teollisuudessa että muissa toiminnoissa pyritään yhä enemmän käyttämään elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia yhtenä tuotteiden ja materiaalien valintaperusteena. Myös rakennusalalla on viime vuosina kehitetty menetelmiä materiaalien ympäristövaikutusten arviointiin ja ekologisin perustein suoritettavaan vertailuun. Kansainvälisesti hyväksytyn elinkaariarviointimetodiikan kehittäminen rakennustuotteiden ja -hankkeiden analysointiin ja vertailuun on yhtenä osa-alueena myös Tekesin Rakentamisen Ympäristöteknologiaohjelmassa. Tutkimuksissa on pääosin keskitytty talonrakentamisessa käytettävien materiaalien elinkaariarviointiin, mutta yhtenä kohteena on ollut myös sementti- ja asfalttipinnoitteiden vertailu tierakenteissa.

Tämä tutkimus kuuluu ohjelman osa-alueeseen Ympäristögeotekniikka, jossa tavoitteena on muun muassa vähentää teollisuusjätettä kehittämällä sivutuotteesta uusiomateriaaleja maarakentamiseen. Tutkimuksen tavoitteena on laatia selkeä ja toimiva menettelytapa maarakentamisen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointiin ja vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen vertailuun. Arviointimenetelmän olisi jatkossa oltava myös suunnittelijoiden käytettävissä. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti sivutuotteiden ja perinteisten materiaalien vertailuun tienrakennuskäytössä, mutta menettelytapa soveltuu tarvittaessa myös muiden maarakenteiden ympäristövaikutusten arviointiin. Menetelmän soveltuvuuden arvioimiseksi tarkastellaan esimerkkeinä kivihiilituhkan, betonimurskeen ja masuunikuonan tienrakennuskäyttöä, joita verrataan tarkastelussa luonnonmateriaalien käyttöön vastaavissa kohteissa.

Tutkimus on osa laajaa tutkimuskokonaisuutta “Sivutuotteet maa- ja tierakenteissa – käyttökelpoisuuden osoittaminen“. Tähän kokonaisuuteen kuuluu useita osaprojekteja, joissa kokonaistarkastelun helpottamiseksi käytetään mm. osittain samoja esimerkkirakenteita. Pää tavoitteena on laatia menettelytapaopas, jossa määritellään, miten lupa- ja tuotteistamismenettelyssä olisi toimittava sivutuotteiden ympäristökelpoisuuden ja teknisen toimivuuden osoittamiseksi. Jo olemassa olevaa tietoutta täydennetään tutkimuksen osaprojekteissa, joiden tavoitteena on myös tuottaa perusohjeita maarakennuskäytökelpoisuuden arvioinnissa käytettävistä menetelmistä. Muut osaprojektit ja niiden tärkeimmät tavoitteet ovat:

- Teollisuuden sivutuotteiden maarakennuskäytön riskinarviointi, jonka tavoitteena on luoda kirjallisuuden ja aikaisempien tutkimusten perusteella perusmenettelytapaohje riskinarvioinnista maarakennuskäytössä. Tätä varten selvitetään sivutuotteiden sisältämät tyypilliset haitta-aineet ja niiden vaikutukset ja arvioidaan kulkeutumismallien soveltuvuutta haitta-aineiden leviämisen arviointiin.

- Uusiomateriaalien pitkäaikaiskäyttämisen tutkiminen laboratoriossa; tavoitteena on laatia ohjeet liikenteen kuormittamissa maarakenteissa käytettävien uusiomateriaalien tutkimisessa käytettävistä laboratoriokoemenetelmistä ja menettelytavoista sekä tutkimusten tulosten tulkinnasta.
- Teollisuusjätteiden ulkoisen hyödyntämisen ympäristökriteerit; päätavoitteena on eri olosuhteissa hyväksyttävän riskitason arviointi, jolloin ympäristökelpoisuuden arvioinnissa käytettävien tutkimusten tulosten tulkinnassa voitaisiin jatkossa paremmin ottaa huomioon suomalaisen ympäristön erityispiirteet.
- Haitta-aineiden sitoutuminen ja kulkeutuminen maaperässä; tavoitteena on selvittää, millä edellytyksillä muissa geologisissa ja ilmastollisissa olosuhteissa saadut tutkimustulokset haitta-aineiden käyttäytymisestä maaperässä ovat sovellettavissa Suomen olosuhteisiin, sekä tutkia, miten haitta-aineet ovat kulkeutuneet käytännön olosuhteissa.

2. Elinkaariarviointi

Elinkaariarvioinnin perustavoitteena on hankkia mahdollisimman täydellinen tietämys tuotteen tai toiminnon koko elinkaaren aikaisista ympäristövaikutuksista. Arvioinnin tuloksia voidaan käyttää tuotteiden, tuotantoprosessien tai toimintojen vertailuun yritysten päätöksenteossa ja markkinoinnissa, tuotteiden, prosessien ja menetelmien ympäristöoptimoinnin ja parannustarpeiden arvioinnin pohjana sekä yhtenä perustietoja antavana menetelmänä yhteiskunnan päätöksenteossa.

Elinkaariarvioinnin sisältöä ja laajuutta ei ole tarkasti määritelty, koska joustavuus ja tavoitteen mukaisten sovellutusten käyttö on yksi menettelyn perusedellytyksistä. Toisaalta erilaisilla menettelytavoilla ja lähtöoletuksilla tuotettujen tulosten ristiriitaisuus on synnyttänyt tarpeen laatia yleisiä perusohjeita ja yhtenäistää rakennetta ja menettelytapoja mahdollisuuksien mukaan. Tällaisia menettelytapohjeita, joiden periaatteita sovelletaan myös tässä julkaisussa, ovat mm. SETACin (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) 'Code of practice' (1993), Pohjoismaiden ministerineuvoston elinkaarityöryhmän perusohjeisto (Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment, Lindfors et al. 1995) ja ISO-standardit.

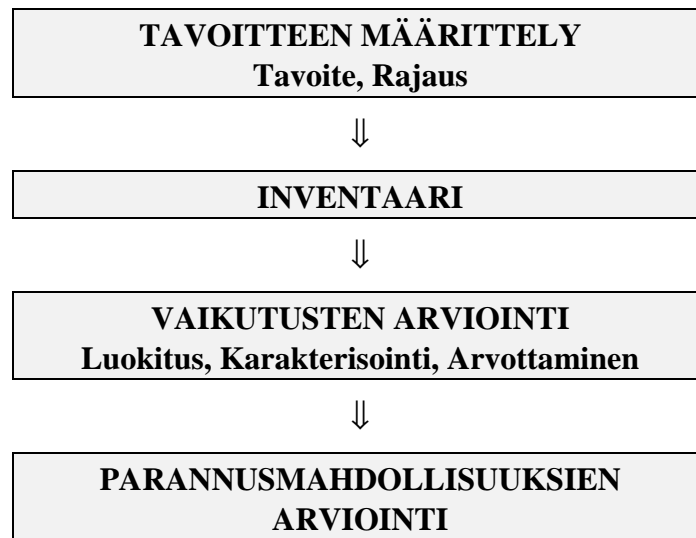
2.1 Arvioinnin toteutus

Elinkaariarvioinnissa määritetään materiaali- ja päästövirrät kaikissa elinkaaren vaiheissa ja tunnistetaan tarkasteltavan järjestelmän tutkimuksen tavoitteen kannalta merkittävimmät haittavaikutukset ja niihin vaikuttavat tekijät. Tarkasteltavat elinkaaren päävaiheet ovat raaka-aineiden otto, tuotteen tai materiaalin valmistus, kuljetukset ja jakelu, käyttö ja kunnossapito, uudelleenkäyttö sekä jätteen käsittely ja sijoitus.

Arvioinnin perusvaiheita ovat tavoitteen määrittely, inventaari eli materiaali- ja päästövirtojen laskenta, vaikutusten arviointi ja tarvittaessa parannusmahdollisuuksien arviointi (kuva 1). Tavoitteen määrittelyvaiheessa määritellään elinkaarianalyysin 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.

Inventoinnilla tarkoitetaan määritellyn systeemin materiaali- ja energiavirta-analyysia, jossa kartoitetaan kaikki tarkasteltavaan järjestelmään tulevat ja siitä poistuvat materiaali- ja energiamäärät. Näitä ovat raaka-aineiden, energian ja veden käyttö, päästöt il-

maan ja vesiin sekä syntyvät jätemäärät ja jätteiden käsittelyn päästöt. Lisäksi tarkasteluun voidaan sisällyttää muita mahdollisia haittoja, kuten melu, ja maan käyttö.



Kuva 1. Elinkaarianalyysin päävaiheet (SETAC 1993).

Vaikutusten arvioinnilla 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. Arvioinnissa käytetään erilaisia menetelmiä numeeristen tulosten sanallisista arvioinneista erilaisiin ympäristökuormituksia pisteyttäviin ja painotaviin menettelyihin. Melko yleisesti käytetään tapaa, jossa ympäristökuormitukset jaetaan ryhmiin mahdollisten ympäristövaikutusten perusteella. Sen jälkeen kuormitukset muutetaan käytettävissä olevan vaikutustiedon perusteella vaikutuksiksi ja painotetaan kunkin ryhmän sisällä vaikutuspotentiaalin mukaan.

Parannusmahdollisuuksien arvioinnilla tarkoitetaan ehdotuksia toimiksi, joilla ympäristövaikutuksia voidaan vähentää. Tämän vaiheen kuulumisesta elinkaariarviointiin ollaan jossain määrin eri mieltä. Tutkimuksen tavoite yleensä määrittää, onko parannusmahdollisuuksien arviointi itse tutkimuksen yhteydessä tarpeen.

Elinkaarianalyysi ei välttämättä ole eikä sen pitäisikään olla lineaarinen prosessi, jossa edellä mainitut vaiheet seuraavat toisiaan. Tulosten merkittävyyttä voidaan arvioida prosessin aikana ja tarvittaessa muuttaa rajauksia siten, että kaikki oleelliset asiat ovat mukana tarkastelussa. Koska arvioinnissa voidaan kaikissa vaiheissa tehdä valintoja ja oletuksia, jotka vaikuttavat tuloksiin, lähtöoletusten ja tulosten raportointi siten, että tiedot voidaan tarkastaa, on tärkeää. Siksi analyysiin olisi sisällytettävä myös herkkyys- ja epävarmuusanalyysi, jonka avulla tarkistetaan, miten paljon tulokset riippuvat tehdyistä valinnoista.

3. Kokemukset rakenteiden elinkaariarvioinnista

3.1 Tie- ja maarakenteiden elinkaariarviointi

3.1.1 Tilanne Suomessa ja muissa maissa

Tie- ja maarakenteiden elinkaariarvioinnista on toistaiseksi melko vähän kokemusta. Ruotsissa IVL on tehnyt tielaitokselle tienrakennuksen alustavan elinkaarianalyysin (Stripple 1995) ja toistaiseksi julkaisemattoman ohjekirjan tierakennuksen elinkaariarvioinnista. Ruotsin tielaitoksen tavoitteena on saada elinkaariarviointi yleiseen käyttöön. Myös Suomessa ja Tanskassa tielaitosten ympäristöohjelmiin on kirjattu yhdeksi tavoitteeksi elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten huomioon ottaminen materiaalien valinnassa (Anon 1996a, Anon 1996b). Tielaitoksen TPPT-ohjelmassa on myös tehty alustava tierakentamisen ja rakennusmateriaalien kartoitus (Koski 1995).

Tekesin Rakentamisen ympäristöteknologiaohjelman yhteydessä tehdyssä tarkastelussa on vertailtu betoni- ja asfalttipinnoitteita tierakenteissa (Häkkinen & Mäkelä 1996). Sekä sementin että bitumin tuottajat ovat tehneet oman tuotantonsa elinkaariarviointeja ja suomalaisen sementin elinkaaritiedot ovat saatavissa (Häkkinen & Mäkelä 1996, Vold & Ronning 1995). Bitumin yleiseurooppalaiset elinkaaritiedot on koottu teollisuuden sisäiseen käyttöön neljän tuotantolaitoksen tietoihin perustuvassa raportissa (Blomberg 1998). Yksittäisen laitoksen tuotetiedot voivat kuitenkin poiketa huomattavasti näistä keskiarvotiedoista.

Lisäksi Suomessa on tehty tai tekeillä tierakenteiden elinkaarikustannusanalyysijä. Toinen jo valmistunut arvio on tehty Oulun Yliopistossa (Kalliokoski 1995) ja toinen elinkaarikustannusanalyysiprojekti on parhaillaan käynnissä TPPT-ohjelman yhteydessä (Ruotoistenmäki *et al.* 1997). Elinkaarikustannusanalyysissä tavoitteena on rakenneratkaisujen rakenteen käyttöajan aikaisten toimenpiteiden kokonaiskustannusten arviointi ja vertailu. Jälkimmäisessä projektissa tavoitteena olevassa suunnittelumallissa on tarkoitus kuitenkin ottaa rakennevaihtoehtojen kustannus- ja liikennevaikutusten lisäksi huomioon myös ympäristövaikutukset. Ympäristövaikutuksia arvioidaan tässä tutkimuksessa tuotettavan tiedon pohjalta.

Maarakennuksessa hyödynnettäviä teollisuuden sivutuotteita on vertailtu toisiinsa tai luonnon raaka-aineisiin muutamissa yksittäisissä arvioissa. Schuurmans-Stehmannin (1994) tekemässä betoni- ja asfalttiteiden elinkaariarviossa tarkasteltiin myös materiaalien uusiokäyttömahdollisuuksia ja niiden vaikutuksia ympäristökuormitukseen. Broers *et al.* (1994) ovat tehneet lannoiteteollisuuden kipsijätteen tienrakennuskäytön elinkaaritarkastelun, jota käsitellään kohdassa 3.1.2 tarkemmin. Dartsch (1993) on arvioinut muun muassa säästöjä, joita saavutettaisiin käyttämällä Saksassa syntyvästä kolmesta

miljoonasta tonnista kivihiilituhkaa kaksi kolmannesta sementtiä korvaavana raaka-aineena betonissa ja vastaavissa rakennustuotteissa. Hänen mukaansa hiilidioksidipäästöt vähenisivät tällöin 1,2 miljoonaa tonnia, energian kulutus 160 miljoonaa kWh ja luonnonraaka-aineiden kulutus 2,3 miljoonaa tonnia. Kivihiilen lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen käyttöä tienrakennuksessa on verrattu perinteisiin luonnonmateriaaleihin Teke-sin ympäristögeotekniikkaohjelmassa toteutetun koerakennusprojektin yhteydessä (Eskola & Mroueh 1998).

3.1.2 Tehtyjen arviointien toteutustapa ja tulokset

Edellisessä kohdassa mainittujen tierakenteiden elinkaariarviointien toteutustapaa ja tuloksia vertaillaan taulukossa 1. Tutkimusten tavoitteet ja lähtökohdat ovat olleet erilaisia ja siksi myös rajaukset ja tarkastelun laajuus ovat vaihdelleet huomattavasti. Tavoite on ollut yksittäisen materiaalin käytön vaikutusten arvioinnista koko tierakenteen elinkaaren aikaisten vaikutusten arviointiin. Tästä huolimatta tutkimusten perusteella voidaan tehdä osittain hyvinkin samantyyppisiä johtopäätöksiä arvioinnin sisällöstä, ongelmista ja kehittämistarpeista.

Tierakenteet poikkeavat selvästi tavanomaisimmista elinkaaritarkastelujen kohteista. Valmiit elinkaarimallit soveltuvat huonosti rakenteiden käsittelyyn, koska arvioinnissa olisi pystyttävä ottamaan huomioon rakennekokonaisuus. Jonkin rakenneosan tai materiaalin vaihto vaikuttaa yleensä myös muuhun rakenteeseen.

Maarakentamisessa massaraaka-aineiden käytöllä, maan käytöllä ja maaperään mahdollisesti pääsevillä haitta-aineilla on suurempi merkitys kuin useimmissa muissa elinkaariarvioinnin sovelluksissa. Tällöin myöskään tavallisesti käytetyt vaikutuspisteetykset ja -arvioinnit eivät välttämättä ole parhaita mahdollisia, koska ne painottavat asioita, joilla maarakenteissa ei ole yhtä suurta merkitystä kuin muualla. Ympäristökuormitusten merkitys vaihtelee myös paikallisten tekijöiden mukaan, jolloin olisi selvitettävä, miten ne voidaan ottaa huomioon vaikutusten arvioinnissa.

Kaikissa tutkimuksissa todettiin, että tarkasteltava maarakenteen käyttöikä ei ole yksiselitteisesti määrättävissä, koska tie- ja maarakenteiden käyttöaikaan vaikuttavat myös itse rakenteesta, sen kunnosta ja toimivuudesta riippumattomat tekijät, kuten yhdyskuntasuunnittelu ja yhdyskuntarakenteen kehitys. Koska rakentamisen lisäksi kunnossapidosta aiheutuvat kuormitukset ovat merkittäviä, käyttöikä olisi valittava riittävän pitkäksi, vähintään 40–50 vuodeksi.

Taulukko 1. Aikaisemmin toteutettujen tie- ja maarakenteiden elinkaariarviointien vertailu.

	Stripple (1995)	Koski (1995)
Tavoite	Tien elinkaaren aikaisten materiaali- ja energiavirtojen laskenta	Tien elinkaaren aikaisten toimintojen ympäristökuormitusten pisteyttävä vertailu, ei tarkkaa laskentaa
Tarkastelu-aika	40 v	20 v
Tarkasteltavat elinkaaren vaiheet	Rakentaminen Käyttö ja kunnossapito Purku ja uudelleenkäyttö	Rakentaminen Käyttö ja kunnossapito Purku ja uudelleenkäyttö
Tarkastelun laajuus	Kaikki tien rakentamiseen ja käyttöön liittyvät toiminnot (myös valot, liikennemerkkit, tiemerkinnot ym.), kaikki rakennekerrokset	Kaikki tien rakentamiseen ja käyttöön liittyvät toiminnot (myös valot, liikennemerkkit, tiemerkinnot ym.), kaikki rakennekerrokset
Tarkastelusta puuttuvat toiminnot	Rakenteen vaikutus liikenteen päästöihin tien käytön aikana	Rakenteen vaikutus liikenteen päästöihin tien käytön aikana
Tarkasteltavat ympäristökuormitukset	Raaka-aineiden kulutus, Energian kulutus, Päästöt ilmaan (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , CO, VOC, hiukkaset) Päästöt veteen (öljyt, fenolit, COD, N)	Raaka-aineiden käyttö Energian kulutus Päästöt ilmaan Päästöt veteen Kiinteät jätteet Muut kuormitukset (kutakin ryhmää tarkastellaan kokonaisuutena tarkemmin yksilöimättä)
Tulosten esittämistapa	Ympäristökuormitukset toiminnallista yksikköä kohti	Arvio kunkin ryhmän ympäristökuormitusten tasosta kolmiportaisella asteikolla

Taulukko 1. jatkuu . . .

Broers (1994)	Häkkinen & Mäkelä (1996)	Eskola & Mroueh (1998)
<p>Lannoiteteollisuuden kipsijätteen sijoitusvaihtoehtojen vertailu</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) tiepengerrys kipsijätteestä 2) tiepengerrys luonnonmateriaalista ja kipsijätteen sijoitus vesistöön 3) tiepengerrys luonnonmateriaalista ja kipsijätteen sijoitus maankaatopaikalle 	<p>Asfaltti- ja betonipinnoitteen ympäristökuormitusten vertailu</p>	<p>Kivihiilivoimalan sivutuotteiden tierakennuskäytön vertailu luonnonmateriaalien käyttöön pääkaupunkiseudulla</p>
60 v.	50 v.	50 v.
Rakentaminen	Rakentaminen Käyttö ja kunnossapito Purku ja uudelleenkäyttö	Rakentaminen
Tiepengerryksen rakentaminen, ei tarkastella muita rakenneosia	Tiepäällysteet, ei tarkastella muita rakenneosia	Tien rakennekerrokset päällystettä lukuun ottamatta
Käyttö ja kunnossapito Purku ja uudelleenkäyttö Muut rakenneosat, vaikutus liikenteen päästöihin	Päällysteen alapuoliset rakennekerrokset, rakenteen vaikutus liikenteen päästöihin	Päällysteet, rakenteen kunnossapito ja käytön jälkeinen sijoitus
Raaka-aineiden käyttö Päästöt ilmaan (kaikki mitatut yhdisteet) Päästöt veteen (kaikki mitatut) Jätteet (Päästöjä maaperään, melua ja tilan käyttöä ei voitu määrittää)	Päästöt ilmaan (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , CO, VOC, CH ₄ , hiukkaset) Raskasmetallien kokonaispäästöt (As, Hg, Cd, Cr, Pb), COD ja N vesiin Energian kulutus	Raaka-aineiden kulutus, Energian kulutus, Päästöt ilmaan (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , CO, VOC, hiukkaset) Päästöt maaperään Melu Maan käyttö Onnettomuusriskit
Vaikutusarvio (kasvihuonevaikutus, happamoituminen, rehevöityminen, oksidanttien muodostuminen, toksisuus ihmiselle, haju)	Ympäristökuormitukset toiminnallista yksikköä kohti	Ympäristökuormitukset toiminnallista yksikköä kohti

Liikenteen aiheuttamat ympäristökuormitukset tien käytön aikana todettiin suuriksi itse tierakenteesta ja sen kunnossapidosta aiheutuviin kuormituksiin verrattuina. Toisaalta liikenteen ja tierakentamisen kuormitukset painottuvat eri lailla, jolloin suora vertailu ei ole täysin yksiselitteistä. Jos rakenteen vaikutus liikenteen ympäristökuormituksiin pystyttäisiin arvioimaan, se saattaisi olla merkittävä energian kulutuksen ja ilmaan joutuvien päästöjen osalta. Nykyisten tietojen pohjalta vaikutusta vaihtoehtoisille rakenteille on kuitenkin erittäin vaikea arvioida.

Ympäristökuormituksia ja teknistä toimivuutta koskeviin tietoihin liittyy paljon epävarmuuksia, erityisesti sivutuotteilla ja muilla materiaaleilla, joista on vielä vähän käyttökokemusta. Siksi epävarmuuksien ja lähtöoletusten muutosten vaikutusten arviointi herkkyysanalyysillä on erittäin tärkeää.

3.2 Yleiset rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointimenetelmät

Maarakenteiden elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arvioinnilla on monia yhtymäkohtia yleiseen rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointiin, jonka menettelytapoja on viime vuosina kehitelty sekä Suomessa että monissa muissa maissa, kuten Yhdysvalloissa (AIA 1996), useissa Keski-Euroopan maissa (Steiger 1996) ja Pohjoismaissa. Menettelytapakehitystä on tehty myös useissa kansainvälisissä projekteissa ja työryhmissä (Häkkinen *et al.* 1997). Yhtymäkohtia ovat osittain yhteiset materiaalit, suuret raaka-aineiden käyttömäärät, tarve tarkastella rakenteita ja rakenneosia myös kokonaisuutena pelkkien materiaalivertailujen sijasta ja pitkä käyttöikä, jonka vuoksi materiaalien ja rakenteiden kestävyys ja kunnossapitotarve voivat vaikuttaa merkittävästi elinkaaren aikaisiin ympäristövaikutuksiin. Koska lähtökohtana on ollut ensi sijassa menetelmien hyödyntäminen talonrakentamisessa, tierakentamisen erityispiirteet ja -toiminnot jäävät kuitenkin näissä yleisissä malleissa huomiotta.

Häkkinen *et al.* (1997) tutkimuksessa tavoitteena oli muotoilla ehdotus rakennusmateriaalien ja -tuotteiden ympäristöarvioinnin menettelytavaksi ja tulosten ilmoittamismuodoksi. Tutkimusraportissa esitetään elinkaariarvion yleiset periaatteet, ehdotus rakennustuotteiden ympäristövaikutusten arvioinnin menettelytavaksi ja tulosten esittämismuodoksi (taulukko 2) sekä elinkaariarvion tuloksia rakennustuotteista ja tarkastelun kohteeksi valituista ulkoseinärakenteista. Lisäksi raportissa tarkastellaan käyttöikäarvioiden liittämistä elinkaaritarkasteluihin, rakennustuotteiden terveystuotteiden arviointia ja luokittelua sekä yleisesti elinkaariarvioiden tuloksen arvottamisen mahdollisuuksia.

Materiaalien ympäristöominaisuuksien arviointikaavakkeessa on pyritty etsimään yksinkertainen tapa esittää talonrakennusmateriaaleja parhaiten kuvaavat tekijät. Perinteisessä elinkaariarvioinnissa esitettävistä ominaisuuksista on valittu mukaan vain merkittävimmät, ja muille vaikutuksille on etsitty käyttökohteen mukaisia indikaattoreita. Näistä päästöt sisäilmaan ja materiaalien sisäinen energia ovat selkeästi maarakennusmateriaaleille soveltumattomia tai vähämerkityksisiä. Myös materiaalihukka painottuu talorakenteissa ympäristön kannalta haitallisempiin materiaaleihin. Vaikutus käytön aikaiseen energiankulutukseen vastaa tierakenteissa rakenteen vaikutusta liikenteen aiheuttamiin ympäristökuormituksiin, joka on merkittävä, mutta nykytietojen pohjalta vielä mahdoton määrittää.

Taulukko 2. Ehdotus rakennustuotteiden ympäristö- ja terveysominaisuuksien esitysmuodoksi (Häkkinen et al. 1997). Lomake on laadittu talonrakentamisessa käytettäville tuotteille.

Tuotetiedot	Nimi Tuotenimi Käyttökohde Tuotedimensiot Koostumus Tiheys
Käyttöikä ja käytön edellytykset	Suunniteltu käyttöikä Edellytykset ja rajoitukset
Energiasisältö (MJ/kg)	Uusiutuva Uusiutumaton
Vaikutus käytön aikaiseen energiankulutukseen (MJ/kg/50 vuotta)	Vaikutus käytön aikaiseen energiankulutukseen tavalliseen tasoon verrattuna
Raaka-aineiden käyttö (kg/kg)	Uusio- ja uusiutuvat raaka-aineet Uusiutumattomat raaka-aineet
Päästöt	Ilmaston lämpenemiseen vaikuttavat (g CO ₂ /kg) Happamoitumiseen vaikuttavat (g SO ₂ /kg) Oksidanttien muodostukseen vaikuttavat (g eteeni/kg)
Tuotteen, rakennusaikaisen hukan ja pakkauksen kierrätys ja loppusijoitus	Uusiokäyttö ja toistokäyttö Purkutuetteen oma käyttö polttoaineena
Terveellisyys asennuksessa ja purkutyössä	Rakennusaikainen suojaus - kosteussuojaus Käsittely ja purkutyö - suojaimien käyttö
Terveellisyys käytössä	Materiaalien sisäilmaemissioluokka Sisäilmaemission minimointimahdollisuudet - käyttöönottoaika - pintakäsittely - käyttöolosuhteet

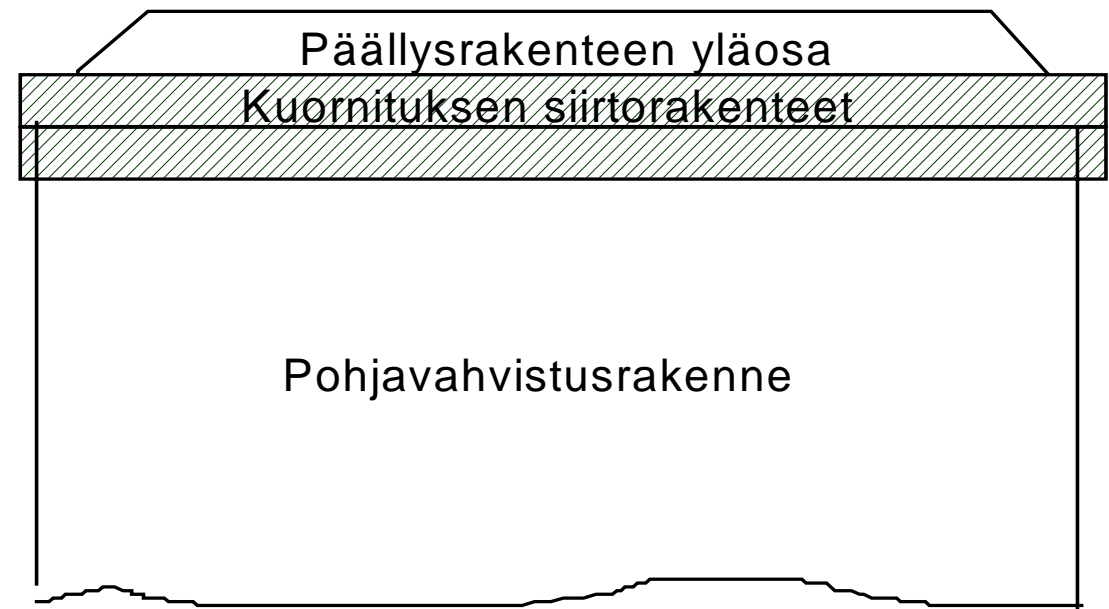
Rakennustuotteiden elinkaariarvioinnissa pidettiin ongelmallisena erityisesti rakennusten pitkää käyttöikää, minkä vuoksi joudutaan arvioimaan tarkasteltavien tuotteiden tai tuotteiden osien huolto- ja korjaustarvetta sekä uusimisjaksoja, jotta vertailun kohteena olisivat tasavertaiset toiminnalliset yksiköt. Tämä pätee myös tierakenteeseen ja tienrakennusmateriaaleihin. Tarkasteluajaksi valittiin tutkimuksessa 100 vuotta. Tutkimuksessa todetaan, että käytettyjen rakennusmateriaalien käyttöikä vaikuttaa merkittävästi ympäristökuormien syntymiseen tarkastelujakson kuluessa. Materiaalien korjaus- ja uusimistarpeen arvioiminen osoittautui kuitenkin vaikeaksi.

Menettelytapaa käytettiin yksinkertaistettuna myös muutamien seinärakenteiden vertailuun. Materiaalien ympäristöominaisuuksista otettiin tällöin mukaan vain päästöt ilmaan ja energian kulutus. Materiaalien kestävyys todettiin erittäin merkittäväksi, koska esimerkiksi sandwich-elementtiseinissä rakenteen korjausten ympäristövaikutukset voivat nousta yhtä suuriksi kuin rakentamisen vaikutukset.

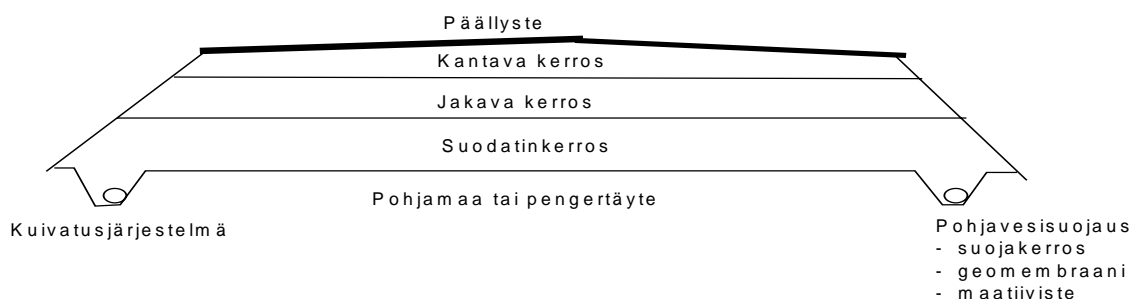
4. Tie- ja maarakenteiden materiaalit

4.1 Tierakenteen perusmalli

Monia maarakenteita voidaan yksinkertaistaen kuvata tierakenteen perusmallia käyttäen (kuva 2). Rakenteista ja pohjasuhteista riippuen kaikkia kuvassa olevia rakenteellisia osia ei aina välttämättä tarvita. Tien rakenneperiaate kantavalla maapohjalla ja ylärakenteen tarkempi kerrosjako esitetään kuvassa 3. Matala penger luetaan yleensä ylärakenteeseen kuuluvaksi. Katu-, kenttä- ja piharakenteissa käytetään yleensä vastaavaa kerrosjakoa, mutta ylärakenteen rakennekerrokset ovat jonkin verran ohuempia, mm. alhaisempien liikennekuormitusten vuoksi.



Kuva 2. Tie- ja kenttärakenteiden rakenteelliset osat, kun pohjamaa on heikosti kantavaa ja painuvaa.



Kuva 3. Tien rakenneperiaate ja päällysrakenteen kerrosjako, kun pohjamaa on hyvin kantavaa.

4.1.1 Rakenneosien toiminta

Pohjavahvistusrakenteet ja kuormituksen siirtorakenteet

Pohjavahvistusrakenteiden tehtävänä on poistaa rakenteen painuma tai pienentää kokonaispainuma sallittavalle tasolle. Pohjarakenteilla varmistetaan myös maapohjan geotekninen kantokyky eli stabiliteetti. Heikosti kantavilla ja painuvilla pohjilla tierakenteet perustetaan yleensä vahvistetun maapohjan varaan tai paaluille.

Tarkasti ottaen pohjavahvistusmenetelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joilla pyritään parantamaan rakennuspaikalla olevan maan geoteknisiä ominaisuuksia. Tämä voidaan tehdä huokostilavuutta pienentämällä, poistamalla maasta vettä tai täyttämällä maan huokostilaa sideaineilla. Taulukossa 3 esitetyistä pohjavahvistusmenetelmistä käytetään yleisimmin tie- ja maarakennuksessa stabilointia ja esikonsolidointia. Tässä pohjavahvistustoimenpiteiksi on laskettu myös massanvaihto ja keventäminen, joissa voidaan hyödyntää myös uusiotuotteita samoin kuin syvä- ja massastabiloinnissa.

Taulukko 3. Pohjavahvistusmenetelmien ryhmittely (RIL 166, 1986).

Syvätiivistys	Täryhuhtelu Syvätyrytys Räjäytykset Pudotustiivistys (dynaaminen konsolidaatio) Tiivistyspaalutus Syrjäytysinjektointi
Esikonsolidointi	Ylikuormitus (ylipenger, vesitankit, vakuumi) Pystyjoitus (hiekk- tai luiskapystyjojat) Elektro-osmoosi
Injektointi	Sementti- tai bentoniitti-injektointi Kemiallinen injektointi Kalkkilieteinjektointi Elektrokineettinen injektointi Vesisuihkuinjektointi Syrjäytysinjektointi
Stabilointi	Pilaristabilointi Massastabilointi Stabilointi kaivamalla ja täyttämällä Terminen stabilointi (jäädytys, poltto)
Maan lujitteet	Sora- ja murskepillarit Maan naulaus Juuripaalut Lujiteliuskat, -verkot, -kankaat, -kalvot

Syvästabiloinnissa ylärakenteista tulevat kuormat siirretään stabiloiduilla pilareilla joko kantavaan maapohjaan (lujat pilarit – painuma aiheutuu pilarien kokoonpuristumisesta) tai kokonaan tai osittain maakerrosten varaan (lujat ja puolilujat pilarit – painumat pienenevät pilarien ja niiden pään alla olevien kerrosten ominaisuuksista riippuen). Massastabiloinnissa huonosti kantava maan pintaosa stabiloidaan kokonaisuudessaan jopa usean metrin syvyyteen saakka.

Massanvaihdossa joko korvataan runsaasti kokoonpuristuvat luonnonmaamassat tai heikot maakerrokset kovaan pohjaan asti (painuma aiheutuu rakennetun täytteen kokoonpuristumisesta) tai korvataan pehmeät pintakerrokset osittaisella massanvaihdolla määräsyyvyyteen (painuma aiheutuu täytteen ja massanvaihdon alapuolelle jäävien maakerrosten kokoonpuristumisesta).

Kevennyksessä maan pintakerroksia korvataan keveämmällä materiaalilla joko täydellistä kevennystä (poistetaan kevennyksen alapuolelle jäävästä pehmeästä maapohjasta aiheutuvat kokonaispainumat kokonaan) tai osittaista kevennystä (korvataan maan pehmeät pintakerrokset määräsyyvyyteen) käyttäen sellaiseen syvyyteen, että kevennyksen alapuolelle jäävien kokoonpuristuvien maakerrosten aiheuttama kokonaispainuma pysyy suunnitelluissa tai siedetyissä rajoissa.

Kuormituksen siirtorakenteiden tehtävänä on siirtää ylärakenteesta ja sen pinnalla vaikuttavasta hyötykuormasta aiheutuva kuormitus pohjarakenteille ja samalla varmistaa päälly- ja pohjarakenteiden yhteistoiminta. Stabiloitujen pilareiden tai paalujen yhteydessä siirtorakenteena käytetään yleensä louheesta tehtyä holvauskerrosta tai muusta materiaalista tehtyä ja stabiloimalla vahvistettua materiaalia. Holvauskerroksen toimintaa voidaan parantaa myös lujitteilla, joina käytetään nykyisin usein geosynteettisiä tuotteita. Holvauskerroksen tulee muodostaa pilareiden päälle ja väliin pysyvä holvaus siten, että holvauskerroksen materiaali ja sen päällä olevat kerrokset eivät pääse pilareiden välistä kuormittamaan niiden välissä olevaa pehmeää maapohjaa.

Siirtorakenteena voidaan käyttää myös massastabilointia (syvä- tai pintastabilointi), jolla muodostetaan pohjamaan pintaosaan paikalla sekoittaen tai valmiiksi sekoitetusta massasta pohjamaata lujempi kerros. Tämä kerros jakaa ja siirtää penkereestä ja ylärakenteista aiheutuvat kuormat luonnontilaiselle pohjamaalle. Massastabilointia voidaan käyttää myös korvaamaan massanvaihtoa.

Eräänlaisina kuormituksen siirtorakenteina voidaan pitää myös pengerrakenteita. Tien ylärakenteiden alle rakennetaan penger, jos tasausviivan korkeustaso vaatii sitä maaston korkeussuhteiden takia. Penkerein avulla myös jaetaan tien ylärakenteista ja hyötykuormasta aiheutuva kuormitus alla olevalle maapohjalle. Samalla tien pinnalla esiintyvät pohjamaasta aiheutuvat painumaerot pienenevät, vaikka penkerein omasta painosta johtuen varsinkin pehmeän pohjamaan kokoonpuristumisesta aiheutuvat

kokonaispainumat kasvavat. Penger materiaalin tulee yleensä olla routimatonta. Routiva materiaali soveltuu käytettäväksi vain routarajan alapuolelle.

Käyttämällä tiepenkereessä tavanomaisia maa- ja kiviaineksia kevyempiä rakennusmateriaaleja (kevennysmateriaaleja, maata kevyempiä täyte- tai uusiomateriaaleja) saadaan penkereen painoa pienennetyksi. Tällöin pohjamaahan kohdistuva kuormitus ja sen aiheuttama painuminen pienenevät. Samalla yleensä pienenevät myös painumaerot tien pinnalla. Jos pengermateriaali stabiloidaan, penkereen lujuus ja jäykkyys lisääntyvät ja maapohjasta ja sen epähomogeenisuudesta aiheutuvat painumaerot tien pinnalla edelleen pienenevät ja tien geotekninen kantavuus paranee.

Ylärakenteen rakennekerrokset

Eristyskerros

Eristyskerroksen, josta käytetään myös nimitystä suodatinkerros, ensisijaisia tehtäviä ovat pohjamaassa olevan veden kapillaarisen nousun katkaiseminen, rakennekerrosten ja pohjamaan erottaminen toisistaan ja vedenvirtauksen aiheuttaman toisiinsa sekoittumisen estäminen ja rakenteesta tulevan veden poisjohtaminen. Yleensä eristyskerros myös ehkäisee tai ainakin hidastaa roudan tunkeutumista routivaan pohjamaahan ja tasaa routanousueroja.

Jakava kerros

Jakavan kerroksen tehtävät ovat kuormituksen jakaminen pohjamaalle ja routivan pohjamaan routimishaittojen ehkäisy. Jakavalla kerroksella tulee olla riittävä kantavuus. Jakava kerros voidaan tehdä tietyt rakeisuusvaatimukset omaavasta materiaalista sitomattomana ja hienorakeisemmista materiaaleista sidottuna kerroksena.

Kantava kerros

Kantavan kerroksen tehtävänä on luoda tierakenteelle jäykkyyttä ja jakaa liikennekuormitusta laajemmalle jakavaan kerrokseen ja pohjamaahan. Kantavaan ja jakavaan kerrokseen käytettävällä sitomattomalla materiaalilla tulee olla riittävä kantavuus (lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet) ja sopiva rakeisuus (vedenläpäisevyys, routimattomuus) ja sen tulee olla tiivistettävissä rakenteessa riittävään tiiviyssasteeseen (rakeisuus, tiivistettävyys).

Myös kantava kerros voi olla sidottu. Bitumia sideaineena käyttäen valmistetaan asfalttibetonia (ABK), jota on aikaisemmin kutsuttu bitumisoraksi (BS). Alemman tie-luokan teille tehdään usein bitumistabilointi (BST), joka tehdään paikalla-sekoitusmenetelmällä. Sideaineena on kuuma vaahdotettu bitumi tai kylmä bitumi-emulsio. Maabetoni (MB) valmiste-

taan hydraulista sideainetta (nykyisin yleensä sementtiä) käyttäen. Tierakennuksessa maabetonissa käytetään yleensä suhteittamatonta kiviainesta ja tiesekoitusta paikanpäällä työkohteessa. Suhteitettua kiviainesta käyttäen maabetonista saadaan merkittävästi jäykempi rakenne kuin vastaavasta stabiloidusta kerroksesta.

Kulutuskerros tai päällyste

Kulutuskerroksen tai päällysteen tehtävä on ottaa vastaan liikenteestä aiheutuvat rasitukset ja taata liikenteelle (ajoneuvoille) tasainen tien pinta. Pinnalta vaadittavia ominaisuuksia ovat tasaisuus, sileys tai karkeus (meluttomuus), karkeus tai kitka ja valonheijastuvuus.

Päällysteellä tulee olla riittävä lujuus, kantavuus ja kulutuksenkestävyys. Päällyste toimii myös alla olevien kerrosten mekaanisena suojana. Ehjänä päällyste estää alempia rakennekerroksia kastumasta päältäpäin (pois lukien avoimet päällysteet). Uusiomateriaalien käyttömahdollisuuksille päällysteen ja sen vedenläpäisevyyden merkitys saattaa olla merkittävä.

4.2 Perinteiset tie- ja maarakennusmateriaalit

Suurin osa tie- ja maarakenteissa käytettävistä materiaaleista on luonnosta saatavia, geologisten prosessien seurauksena syntyneitä maamateriaaleja. Nämä materiaalit ovat hyvin tutkittuja ja tunnettuja ja niiden käytöstä on kertynyt runsaasti kokemusta. Jo pelkästään materiaalin rakeisuuden perusteella niiden ominaisuuksia voidaan arvioida melko laajasti ja usein myös luotettavasti. Maamateriaaleja on käytetty useimmissa käyttökohteissa sellaisenaan eli sitomattomina.

Tie- ja maarakentamiseen parhaiten soveltuvien materiaalien (sorat ja hiekat) tarve on suuri. Parhaiden materiaalien vähentyminen, kuljetusmatkojen piteneminen ja luonnonsuojelunäkökohdat ovat lisänneet soraa ja hiekkaa korvaavien materiaalien käyttöönottarvetta. Hyvälaatuisia, karkearakeisia maarakennusmateriaaleja on tehty esimerkiksi kalliota murskaamalla (louhe, murske). Korvaavia materiaaleja on etsitty nykyisen käytännön mukaisesti heikkolaatuisiksi luokitelluista maalajeista (esim. hienorakeiset kivennäismaalajit, moreenit, turpeet). Nämä maamateriaalit on yleensä käsiteltävä jollain tavalla (stabiloitava, seulottava, murskattava, pelletoitava), ennen kuin niitä voidaan teknisesti käyttää kuormitetuissa maarakenteissa. Sellaisenaan tierakenteissa heikkolaatuisiksi luokiteltavia materiaaleja on käytetty erilaisiin täyttöihin, patojen tiivistesydamien rakennusaineena ja erityyppisissä pohjaveden suojausrakenteissa.

Käsittelytarve ei ole materiaalin hyödyntämisen ylitsepääsemätön este. Raskaasti kuormitetuissa korkealuokkaisissa rakenteissa tehdään paksuja sidottuja tai muuten sta-

biloituja kerroksia jo perinteisiäkin perusmateriaaleja käyttäen. Stabilointi jopa lisää käytettäviksi soveltuvien uusiotuotteiden määrää, koska mahdollisten haitta-aineiden liukoisuuksien voidaan stabiloiduista uusiotuotteista perustellusti olettaa olevan stabilointimateriaalia vähäisempää. Stabiloidussa rakennekerroksessa voidaan lisäksi hyödyntää hienorakeisiäkin materiaaleja.

4.2.1 Perinteisten materiaalien käyttö rakennekerroksissa

Taulukossa 4 esitetään tie- ja katurakenteiden ja niihin rinnastettavien rakenteiden rakennekerroksissa nykyisin käytettäviä ja käyttökelpoisia perinteisiä materiaaleja. Uusiomateriaalien osalta vastaavaa soveltuvuutta ei ole mahdollista esittää, vaikka joidenkin materiaalien soveltumisalueet alkavatkin jo hahmottua.

Taulukko 4. Tie- ja katurakenteissa ja niitä vastaavissa rakenteissa nykyisin käytettäviä materiaaleja.

Rakennekerros	Perinteinen kerrosmateriaali	Vaadittava moduuli	Muita vaatimuksia
Päällyste (sidottu)	asfaltti betoni		
Kulutuseros	sidemaa + moreenimurske soramurske, kalliomurske		
Kantava kerros (sitomaton)	kalliomurske, KaM soramurske, SrM	$E \geq 280 \text{ MPa}$	Rakeisuus ohjerakeisuusalueen mukainen
Jakava kerros (sitomaton)	murske, M sora, Sr sorainen hiekka, SrHk	$E \geq 200 \text{ MPa}$	Rakeisuus ohjerakeisuusalueen mukainen
Suodatinkerros	hiekkä, Hk	$E \geq 50 \text{ MPa}$	Rakeisuus Suodatuskriteerit Kapillaarisuusvaatimukset
Pengertäyte	louhe karkearakeiset materiaalit muut tiivistämiskelpoiset materiaalit, myös uusiomateriaalit		Routivuus- ja kuivatustekijöiden sekä stabiliteetin huomioiminen
Kuormien siirtorakenteet	louhe karkea murske stabiloidut massat		Holvaavan rakenteen aikaansaaminen
Massanvaihto ja kevennykset	karkearakeiset materiaalit tuhkat, kuonat, kevytsora, EPS-solumuovi sahanpuru, turve		Korvattavaa materiaalia kantavampi tai kevyempi materiaali
Pilari- ja massastabilointi	sementillä, kalkilla tai niiden seoksella tai uusiomateriaalilla stabiloitu massa		Materiaalin lujittaminen, sitominen

Kulutuskerrokset ja päällysteet tehdään nykyisin lähes poikkeuksetta sidottuina. Kiviainesta käytetään asfaltti- ja betonipäällysteiden runkoaineena. Suomessa betonipäällysteet näyttävät kuitenkin olevan syrjäytymässä saatujen huonohkojen kokemusten ja asfalttipäällysteitä suurempien kokonaiskustannusten vuoksi.

Sorateilla käytettävät sidotut (tässä: runkoaineen sidonta savella) kulutuskerrokset tehdään perinteisesti moreenimurskeesta, soramurskeesta tai kalliomurskeesta, koska luonnon sora ja moreeni eivät yleensä täytä laatuvaatimuksia. Sitomattoman kantavan kerroksen materiaalina käytetään yleisimmin kalliomursketta (KaM) tai soramursketta (SrM), jos sitä on saatavissa helpommin kuin soraa. Tarvittaessa kantava kerros stabiloidaan bitumilla (ABK) tai hydraulisella sideaineella (MB).

Sitomattoman jakavan kerroksen materiaalina käytetään yleensä mursketta ja soraa tai soraista hiekkaa. Tarvittaessa, kuten suurempaa kantavuutta haluttaessa, jakava kerros stabiloidaan hydraulisella sideaineella. Koska jakavan kerroksen kantavuusvaatimukset ovat kantavaa kerrosta alhaisemmat, tehdään stabilointi pienemmällä sideainemäärällä.

Myös materiaalin rakeisuus voi poiketa parhaan tiivistystuloksen antavan käyrän muodosta. Suodatin- ja eristyskerroksessa käytetään nykyisin yleensä hiekkaa. Kahden maakerroksen toisistaan erottamisessa hiekka korvataan usein suodatinkankaalla.

Kuormituksen siirtorakenteissa käytetään stabiloitujen pilareiden tai paalujen yhteydessä yleensä karkeasta louheesta tehtyä holvauskerrosta. Louhetta käytetään korkealuokkaisilla teillä yleensä myös pengerrakenteissa. Vaihtoehtoisesti penkereissä käytetään hyvin karkearakeisia maalajeja. Stabiloitujen pilarien tai paalujen kanssa voidaan holvauskerros tai penger tehdä stabiloituna myös heikompilaatuisista materiaaleista massastabiloinnilla. Massastabilointia voidaan käyttää myös ilman pilareja pohjavahvistuksena ja kuormituksen siirtorakenteena. Massastabiloinnilla luodaan näin keinotekoinen kuivakuorikerros rakenteen alle.

Stabiloiduissa pilareissa ja massastabiloinnissa on sideaineena käytetty yleensä kalkkia tai sementtiä sekä näiden seoksia. Viime vuosina sideainetoimittajilta on tullut markkinoille ollut myös sideaineita, joissa uusiutuotteet muodostavat vaihtelevan suuruisen osan sideaineen koostumuksesta. Myös massanvaihdossa, etenkin jos tarkoituksena on samanaikaisesti myös keventää rakenteita, perinteisesti käytettyjä karkearakeisia maamateriaaleja korvataan tuhkillä ja kuonilla.

Toistaiseksi uusiutuotteiden soveltuvuuden arvioinnissa on käytetty karkeaa luokittelua sideaineisiin, runkoaineisiin, täyteaineisiin ja muihin materiaaleihin. Näiden määritelmät on esitetty VTT Yhdyskuntatekniikan tutkimusraportissa 278, ”Uusiutuotteiden maarakennuskäytön edellyttämät tutkimukset laboratoriossa ja koerakenteilla”.

Perinteisten materiaalien sijoittuminen tämän luokittelun mukaisiin luokkiin esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Perinteisten materiaalien käyttötavat.

Käyttötapa	Perinteinen materiaali
Sideaine	Sementti, kalkki
Runkomateriaali	Sora, karkea hiekka, soramoreeni, murske
Täytemateriaali	Hieno hiekka, karkea siltti, hiekkamoreeni
Muu materiaali	Silttimoreeni, savi, hieno siltti, lieju

4.3 Tie- ja maarakenteisiin soveltuvat uusiomateriaalit

Teollisuudessa, rakennustoiminnassa tai muuten käytöstä poistettuna syntyy suuria määriä erityyppisiä jätteitä ja sivutuotteita. Esimerkiksi kivihiilen tuhkia ja joitakin metallurgisen teollisuuden sivutuotteita on käytetty maarakentamisessa jo melko pitkään. Aikaisemmin materiaalien käyttö on kuitenkin usein ollut huonosti suunniteltua ja rakentamisvaihe ja rakenteen seuranta heikosti dokumentoituja. Myös materiaaleja tuottavissa prosesseissa, kuten energiatuotannon polttoprosesseissa ja savukaasujen puhdistusprosesseissa sekä metallien valmistusprosesseissa, on tapahtunut ja tulevaisuudessakin tapahtuu tuotekehitystä. Valmistusprosessien muutos vaikuttaa aina myös syntyvään sivutuotteeseen.

Taulukon 6 materiaaleja käytetään jo maarakentamisessa suhteellisen paljon ja siksi niiden ympäristökelpoisuutta ja teknistä soveltuvuutta on myös tutkittu eniten. Muutamille materiaaleille on myös laadittu suunnitteluohjeet.

Taulukko 6. Maarakenteissa nykyisin käytettäviä teollisuuden sivutuotteita ja niiden arvioitua käyttömääriä. Määrätiedot ovat vuosilta 1996–1997.

Teollisuudenala	Vuosittain syntyvä määrä, t/a	Maarakennuksessa käytettävä määrä, t/a	Muita käyttökohteita
Energiantuotanto			
Kivihiilen lentotuhka	380 000	190 000 (50 %)	Betoni- ja sementti-teollisuus, asfaltin täyteaine
Kivihiilen pohjatuhka	95 000	76 000 (80 %)	
Kivihiilen rikinpoistotuote, puolikuivamenetelmä	30 000	12 000 (40 %)	
Turvetuhkat	130 000	60 %	
Metallurginen teollisuus			
Masuunihiekka – sellaisenaan tierakennukseen – sideaineeksi jauhettuna	550 000	200 000 (36 %) 120 000 (22 %)	Sementin valmistus Lannoitekäyttö
LD-teräskuona	170 000	18 500 (10 %)	Maatalouskäyttö
Ferrokromikuona	290 000	290 000 (100 %)	
Rakennustoiminta			
Betonimurske – purkujäte – uudisrakentamisen jäte – betoniteollisuuden jäte	400 000 100 000 70 000	20 000 (4 %) v. 97 80 000 (15 %) v.98	
Maa- ja tienrakennus			
Päällysteet	150 000		Kierrätys tiepäällysteisiin
Rakennekerrokset	160 000		

Taulukossa 7 esitetään muita mahdollisesti hyötykäyttöön soveltuvia materiaaleja, joista osaa on ainakin alustavasti tutkittu ja käytetty koerakenteissa tai niiden käyttöä ollaan suunnittelemassa. Sivutuotteita, joiden massamäärät ovat pieniä tai joiden ominaisuudet, kuten haitta-aineiden liukenevuus, vaikeuttavat hyödyntämistä, ei ole juuri tutkittu.

Taulukko 7. Muita maarakennuksessa mahdollisesti hyödynnettäviksi soveltuvia teollisuuden ja muun tuotannon sivutuotteita.

Teollisuudenala	Vuosittain syntyvä määrä, t	Pääasialliset käyttökohteet	Hyötykäyttö v. 97
Energiantuotanto			
Märkämenetelmän kipsi	80 000	Kipsilevyteollisuus	70 %
Sekatuhka	300 000		40–50 %
Puutuhka			
Metallurginen teollisuus			
Nikkelikuona	120 000		
Cu-rikastehiekka	250 000		
Rikinpoistokuona	40 000–50 000		
Teräsenkakuona	20 000		
Jaloteräskuona	160 000		
Sähköteräskuona	25 000		
Kaivos- ja valimoteollisuus			
Valimohiekka	130 000		
Sivukivi- ja malmikaivokset	6 200 000		
Sivukivi- ja kalkkikaivokset	900 000		
Sivukivi- ja mineraalikaivokset	3 200 000		
Jätekivi, ylijäämämaa	4 500 000		
Rakennustoiminta			
Rakennuskiviteollisuuden sivukivi	3 000 000		
Tierakennuksen seosjäte (kantava + päällyste)	600 000		
Tiilijäte	50 000–75 000	Käyttö rakennustiilenä Maarakennus	Pieniä määriä
Kemianteollisuus			
Kipsi	1 100 000		
Kipsi (rautapitoinen)	70 000		
"Muta" (ilmeniittäjä)	50 000		
Paperiteollisuus			
Kuitu- ja pastalietteet	50 000	Kaatopaikan peitemateriaali	
OPA-sakka			
Siistausjäte		Kaatopaikan peitemateriaali	
0-kuitu			
Viherlipesakka	95 000		
Yhdyskuntajätteet			
Jäterenkaat	30 000	Pinnoitus, uudelleenkäyttö Sementtiteoll. polttoaine Maarakennus	n. 3 000 t (10 %) n. 5 000 t (20 %) n. 9 000 t (30 %)
Muovirouhe		Asfaltin valmistus	Koekohteita 97
Lasijäte	64 000		

4.3.1 Energiantuotannon sivutuotteet

Sähkön ja lämpöenergian tuotannossa syntyy kivihiilen, turpeen, puun ja näiden sekapolton palamistuotteena tuhkaa. Tuhkan laatuun ja tyyppiin vaikuttavat polttoaineen koostumus ja karkeus, voimalaitoksen polttolaitteiston tyyppi ja polttolämpötila. Leijupoltossa tuhkan seassa on polttoprosessissa käytettävää hienoa hiekkaa. Kivihiilituhkat jaotellaan savukaasuista eroteltuun lentotuhkaan, jauhetun hiilen poltosta palotilan pohjalle jäävään pohjatuhkaan ja murskatun hiilen poltosta palotilan pohjalle jäävään pohjakuonaan.

Kivihiilen poltosta syntyy eniten rakeisuudeltaan silttiä vastaavaa lentotuhkaa. Tämä lentotuhka saadaan yleensä lujittumaan, kun se tiivistetään rakenteeseen sopivassa vesipitoisuudessa. Hiilimurskeen poltossa syntyvä karkeampi, rakeisuudeltaan hienoa hiekkaa vastaava lentotuhka ei ole lujittuvaa. Pohjatuhka vastaa rakeisuudeltaan hiekkaa ja pohjakuona soraa. Kummatkaan näistä tuhista eivät myöskään omaa lujittumisominaisuuksia.

Jos kivihiilen lentotuhkaa varastoidaan kosteana, sen ominaisuudet muuttuvat verrattain nopeasti, mm. rakeisuus karkeutuu ja lujittumiskyky vähenee. Jos lujittumisominaisuuksien edellytetään säilyvän, tuhka on varastoitava kuivassa tai kuljetettava suoraan käyttökohteeseen sitä mukaan, kun tuhkaa syntyy. Tuhkaa syntyy usein liian hitaasti suuriin rakennuskohteisiin ja lisäksi suurimmaksi osaksi talvisaikaan, jolloin rakentamistoiminta on vähäistä. Viime vuosina voimalaitokset ovat rakentaneet tuhkan varastosiiloja, jolloin kuivan tuhkan saantimahdollisuudet eräillä paikkakunnilla ovat parantuneet.

Turpeen (ja puun) poltosta syntyvä sekatuhka on yleensä kivihiilen lentotuhkaa karkeampaa ja sen rakeisuus vastaa hiekkaista silttiä tai silttistä hiekkaa. Myös tämä lentotuhka on kuivana useimmiten lujittuvaa, mutta jo lyhytkin varastointiaika kosteana näyttää heikentävän turvetuhkan lujittumiskykyä merkittävästi. Turvetuhkan käyttömahdollisuuksia pyritään parantamaan rakeistamalla.

Maarakennuksessa karkeampia tuhkia käytetään sellaisenaan korvaamaan rakeisuudeltaan vastaavia maamateriaaleja. Lentotuhkaa käytettäessä lujittumisominaisuudet pyritään hyödyntämään. Lujittuminen edellyttää materiaalin hyvää tiivistämistä, mikä on mahdollista vain vesipitoisuuden pysyessä oikealla tasolla. Löyhissä lentotuhkakerroksissa kantavuus jää alhaiseksi ja niissä on havaittu myös routimista, vaikka hyvin tiivistetty, lujittunut lentotuhka on yleensä lähes routimatonta. Löyhän lentotuhkan heikkoon kantavuuteen vaikuttanee suuresti lentotuhkan korkeahko vesipitoisuus rakenteessa. Eristystarkoituksiin käytetyn tuhkan korkea vesipitoisuus on sen sijaan etu, koska kerroksen jäätymisvastus on tällöin suurempi.

Pääkaupunkiseudulla kivihiilen tuhkaa on käytetty katu- ja maarakenteissa 1970-luvulta alkaen useissa kymmenissä kohteissa etupäässä pysäköinti- ja varastoalueilla sekä jalankulku- ja pyöriteillä. Tuhkia on käytetty myös muutamissa raskaasti kuormitetuissa tie- ja katurakenteissa. Talonrakennuksen maarakenteissa tuhkia ei juurikaan ole käytetty. Kunnallisteknisissä putkirakenteissa tuhkia on käytetty pidättyvästi tuhkien putkistoille aiheuttaman korroosiovaaran takia.

Pohjatuhkaa on käytetty yleensä täytöissä ja pengerrakenteissa ja lujittuvaa lentotuhkaa jakavassa kerroksessa tai kantavan kerroksen alaosassa. Joissain koerakenteissa kaikki rakennekerrokset, asfalttipäällystettä ja sen alla olevaa ohutta murskekerrosta lukuun ottamatta on saatettu korvata lujittuvalla lentotuhkalla. Yleensä lentotuhkaa on käytetty sellaisenaan. Muutamissa tapauksissa lentotuhkaa on rakennekerroksissa sekoitettu hiekkaan tai murskeeseen. Vanhemmissa rakenteissa ei ole yleensä käytetty sementtiä varmistamaan kivihiilen lentotuhkan lujittumista. Pintauksissa lentotuhkaa on saatettu käyttää sitomaan murskekerroksia.

Myös savukaasujen märkä-kuivamenetelmän rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan seoksia on käytetty maarakennuksessa. Seossuhdetta muuttamalla voidaan vaikuttaa seoksen ominaisuuksiin, kuten tilavuuspainoon, puristuslujuuteen ja moduuliin. Käytetyt seossuhteet ovat yleensä 50/50–90/10 (lentotuhka/rikinpoistotuote). Kantavuutta vaativissa maarakenteissa lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksia voidaan periaatteessa käyttää kaikkiin rakennekerroksiin. Alemmissa rakennekerroksissa materiaalia voidaan käyttää ilman sideainelisäystä. Ylemmissä kerroksissa lujuutta ja kantavuutta voidaan parantaa käyttämällä lisäaineena sementtiä, kalkkia tai masuunikuonaa. Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksia ollaan kokeilemassa myös pientä vedenläpäisevyyttä edellyttävissä pohjaveden suojausrakenteissa.

4.3.2 Metallurginen teollisuus

Metallurgisen teollisuuden sivutuotteina syntyy huomattavia määriä erilaisia kuonia, joiden käytöstä tie- ja maarakentamisessa on jo melko pitkät kokemukset. Jokaisella kuonalaadulla on omat varsinaisen valmistettavan tuotteen raaka- ja lisäaineista sekä valmistusmenetelmistä johtuvat erityispiirteensä. Kuonien tärkeimpiä maarakennusominaisuuksia ovat hyvä kantavuus, sitoutumiskyky ja eristyskyky. Näiden erityispiirteiden johdosta terästeollisuuden sivutuotteita voidaan käyttää tie- ja maarakenteissa joko sellaisenaan tai lisäaineina lähes kaikissa rakennekerroksissa kuhunkin käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvaa tuotetta käyttäen. Kuonien rakeisuudet ovat yleensä 0–80 mm (kappalekuona vieläkin karkeampaa).

Ilmajäädytteistä masuunikuonaa on käytetty tierakennusmateriaalina sitomattomissa rakennekerroksissa jo 1970-luvulta lähtien. Tällä vuosikymmenellä tierakenteissa on alettu käyttää myös vesijäädytettyä masuunikuonaa eli masuunihiekkaa. Masuunikuonan jäädytyksessä ollaan siirtymässä pelkästään vesijäädytykseen.

Vesijäädytyksessä masuunikuona rikkoutuu rakeisuudeltaan luonnonhiekkaa muistuttavaan raekokojakautumaan. Tuote on huokoinen ja lasimainen ja sen eristysominaisuudet ovat hyvät. Kemiallisesta koostumuksesta johtuen masuunihiekka toimii myös hydroaulisena sideaineena, joskin se sitoutuu huomattavasti sementtiä hitaammin. Sitoutumista voidaan nopeuttaa muiden sideaineiden lisäyksellä tai materiaalin jauhamisella pienempirakeiseksi. Masuunihiekkaa käytetäänkin maa- ja tierakennuksessa sekä massiivisina rakenteina (jakava ja kantava kerros) että sideaineena. Sekä masuunikuonan että masuunihiekan käytöstä tierakenteissa on jo olemassa julkaisut Tielaitoksen selvityksiä -sarjassa.

Eristystarkoituksiin on käytetty myös jaloterästehtaan (Outokumpu Chrome Oy) vesijäädytettyä ferrokromikuonaa. Kuona vastaa rakeisuudeltaan hiekkaa. Se on myös kantavaa, mutta ei omaa lujittumisominaisuuksia. Ferrokromikuonaa on käytetty erityisesti katurakenteissa ja talonrakennuksessa eristeenä. Tuote tunnetaan kauppanimellä OKTO-eriste.

Muita kehitystyön alaisia terästeollisuuden sivutuotteita ovat mm. terässulattokuona, LD-teräskuona, terässenkkakuona ja rikinpoistokuona. Kuonatuotteiden kehittämistä vastaavan SKJ-Yhtiöt Oy:n ja Tekesin rahoittamana on käynnissä ”Kuonat geotekniikassa” -tutkimusprojekti, jonka pyrkimyksenä on ohjeistaa kuonien käyttö tie- ja maarakentamisessa.

4.3.3 Kemiallinen ja mekaaninen metsäteollisuus

Kemiallisessa metsäteollisuudessa syntyy teollisuuden oman energiatuotannon tuhkien ohella runsaasti erilaisia kuitu- ja sekalietteitä, pastajätteitä ja sakkoja. Useimmille näille on tyypillisiä hyvin korkeat vesipitoisuudet, 100–250 %. Myös tuhkapitoisuudet ovat useimmiten suuret, 30–60 %, samoin kaoliini- ja karbonaattipitoisuudet. Jätteet saattavat sisältää runsaasti kuituja. Palamattoman aineksen määrä vaihtelee suuresti, 20-80 %. Materiaalien ominaisuuksien vuoksi niiden käyttökohteet löytyvät lähinnä käyttökohteista, joissa ei vaadita hyvää kuormituskestävyyttä. Kuituja ja kaoliinia sisältävien lietteiden soveltuvuutta kaatopaikkojen peittorakenteisiin on selvitetty sekä kotimaassa että ulkomailla. Kuituseoksia lisäämällä voitaneen parantaa mm. lentotuhkien ominaisuuksia paremmin muodonmuutoksia kestäviksi.

Mekaanisessa metsäteollisuudessa syntyvää sahanpurua voitaneen termisesti käsitellynä hyödyntää jonkin verran kuormituskestävyyttä edellyttävissä rakenteissa routasuojauksena, kevennyksenä, stabiloituna rakenteena, kuitulujikkeena, joustorakenteena sekä sekundaarisen maa-aineksen parannusmateriaalina. Termisellä käsittelyllä saadaan aikaan täysin kuivaa sahanpurua, jonka kosteuseläminen ja lämmönjohtavuus pienentyvät ja joka muuttuu lahoamattomaksi. Materiaalin käyttöä eristävänä täytemateriaalina kevyen liikenteen väylässä selvitetään parhaillaan mekaanisen metsäteollisuuden ja VTT:n yhteistyönä. Selvitykseen sisältyy myös koerakentamista.

4.3.4 Kaivos- ja valimoteollisuus

Rikastushiekkaa syntyy malmien rikastuksen yhteydessä ja se on pääasiassa hyvin hienoksi jauhautunutta kivimateriaalia. Rakeisuus vaihtelee hienosta hiekasta saveen, pääasiassa materiaali on kuitenkin siltilajitetta. Rikastushiekka saattaa sisältää vaihtelevia määriä jauhatus- ja rikastusprosessissa käytettyjä kemikaaleja. Hiekka pumpataan yleensä erilliselle läjitys- tai allasalueelle, jossa se sedimentoituu: karkein materiaali kerääntyy lähimmäksi purkuputken päätä ja hienoin materiaali jää kauas purkupaikasta hyvin loivan luiskan juuriosaan. Rikastehiekka on teknisiltä ominaisuuksiltaan käyttökelpoista maarakennusmateriaalia.

Valuhiekka on metallivalimoissa syntyvää hiekkaa, jota syntyy noin tonni yhtä valimotuotetonnia kohti. Valuhiekan perusaineena on usein silikaattihiekka, joka on raekoostumukseltaan verrattain tasarakeista keskikarkeaa ja hienoa hiekkaa. Joissakin tapauksissa valuhiekassa saattaa olla “sementoituneita” kappaleita. Valuhiekkaan sekaantuu valussa käytettävästä metallista riippuen vähäisiä määriä metalliepäpuhtauksia, valumuotissa ja sen suojauksessa käytettäviä aineosia sekä mahdollisesti muita hiekkaan käyttöominaisuuksien tai valutuloksen parantamiseksi lisättäviä aineosia.

Tie- ja maarakentamisessa valuhiekkaa on ulkomailla käytetty mm. asfaltin runkoaineen osana. Valimohiekka on teknisesti käyttökelpoista tavallista hiekkaa korvaavana pengermateriaalina. Käyttötietoa maarakennustoiminnasta Suomessa ei ole.

4.3.5 Rakennustoiminta

Rakennustoiminnan betonijätteestä voidaan valmistaa korkealuokkaista maarakennusmateriaalia, betonimursketta. Betonimurskeen raaka-aineeksi soveltuvat betoniteollisuudessa ja uudisrakentamisessa syntyvä jätebetoni, vanhojen rakennusten purkamisen yhteydessä syntyvä jätebetoni ja vanhat ratapölkyt. Jätebetoni murskataan tarkoitukseen soveltuvalla murskaimella murskeeksi (0–70 mm), josta poistetaan betonin raudat. Syn-

tyvässä betonimurskeessa on yleensä vielä jäljellä sitoutumiskykyä, jolloin siitä tehty rakennekerros lujittuu itse rakenteessa.

Suomessa Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy Ab on kehittänyt betonimurskeen käyttöä tierakenteissa (Betoroc-murske). Betoroc-mursketta on käytetty muutamissa tierakennuskohteissa jakavassa ja kantavassa kerroksessa korvaamaan sora- ja kalliomurskeita hyvällä menestyksellä. Betoroc-murskeen käytöstä on olemassa koekäyttöön laadittu suunnitteluohje.

Myös rakennustoiminnassa syntyvä tiilijäte on potentiaalinen maarakennusmateriaali. Tiilijätteestä, joko kokonaisesta tiilestä tai tiilimurskeesta, on rakennettu muutamia katu- ja pihakoekohteita. Tiilimurske näyttää soveltuvan parhaiten suodatin- tai eristyskerrokseen.

Maarakenteissa käytettävien betoni- ja tiilimurskeiden pitää olla mahdollisimman puhtaita muista rakennusjätteistä. Edellytyksenä on siirtyminen lajittelemaan purkuun, jolloin myös erilaisia purkueristeitä voitaneen hyötykäyttää maarakentamisessa.

Rakennustoiminnasta syntyvien betoni- ja tiilimurskeiden ympäristökelpoisuus on yleensä hyvä. Lisäksi jätettä syntyy runsaimmin siellä, missä uutta materiaalia tarvitaan, joten materiaalin saatavuus on hyvä, mikä edellyttää kuitenkin jätteen vastaanotto- ja murskauspisteiden sopivaa sijoittumista.

4.3.6 Tie- ja maarakennustoiminta

Tie- ja maarakenteiden purkujätteiden ympäristökelpoisuus on yleensä hyvä ja jätteet voidaan yleensä myös hyödyntää lähellä niiden syntypaikkaa. Teknisesti käyttöä hankaloittaa materiaalien sekoittuminen purku- ja korjaustöiden yhteydessä. Yleensä sitomattomat materiaalit voidaan palauttaa käyttöön runko- ja täyteaineina joko sellaisenaan tai käsiteltyinä, esimerkiksi seulottuna tai stabiloituna.

Vanhoja asfalttipäällysteitä on jonkin verran hyödynnetty uuden asfaltin raaka-aineena. Nykyisin uusioasfalteiksi nimitettävissä päällysteissä vanhan asfalttirouheen osuus on vähintään 20 %. Kierrättämätön osa asfalttirouheesta on yleensä ajettu kaatopaikalle tai sitä on käytetty myös sellaisenaan alempiarvoisten teiden ja täyttöjen rakennusmateriaalina. Parhailtaan on meneillään VTT:n ja Lemminkäinen Oy:n yhteistyönä tutkimuksia, joissa selvitetään jyrstyn tai paloista murskatun purkuasfaltin osuuden nostamista katu- ja päällysteissä.

4.3.7 Yhdyskuntajäte

Yhdyskuntajätteistä käsitellään tässä yhteydessä ylijäämälasia, sekamuoveja ja autonrenkaita. Jäterenkaat tulee vuonna 1996 voimaan tulleen valtioneuvoston päätöksen mukaan kerätä hyötykäyttöä varten eikä niitä saa viedä kaatopaikalle. Renkaista valmistettavaa, yleensä hyvin hienorakeista kumipulveria on ulkomailla käytetty mm. routaeristeenä ja pehmeän asfaltin ainesosana. Hienoksi jauhettua kumirouhetta on käytetty myös hiekkaan sekoitettuna. Kokonaisena autonrenkaita käytetään mm. penkereissä, luiskissa ja tukimuureissa.

Suomessa ollaan kokeilemassa karkeamman kumirouheen, jonka kappalekoko on 5 x 5 cm² tai 10 x 30 cm², tie- ja maarakennuskäyttöä. Tällainen kumirouhe sisältää myös renkaiden metallilujitteita. Kumirouheen erityisominaisuuksia ovat kestävyys, lujuus, sitkeys, keveys, lämmöneristävyys ja pieni vedenimeytyminen. Siksi sitä voidaan hyödyntää tierakenteissa pehmeiköillä kevennys- ja pengermateriaaleina sekä routaeristeenä. Kuormituskestävyyttä vaativissa rakenteissa rouheesta tehdyn rakennekerroksen joustavuus ja alkukokoonpuristuma edellyttävät rouheen sijoittamista rakenteessa melko alas ja näin ollen paksuja ylärakennekerroksia. Muita käyttökohteita saattaisivat olla kaatopaikkojen kuivatus- ja lämmöneristyskerrokset sekä keveyttä vaativat täytöt ja tukirakenteet.

Tielaitos teki renkaiden hyödyntämisestä tierakenteissa esiselvityksen vuonna 1997. Ensimmäinen kumirouhetta sisältävä koerakenne on tehty samana vuonna ja on nyt seurannassa. Kokeiltavana on myös meluvallin tekeminen kumirouheesta.

Yhdyskuntajätteestä erikseen kerättyä sekajätemuovia sisältävän muoviasfaltin kehittäminen on koerakentamisvaiheessa. Rouhittu muovijäte pehennetään mäntyöljyillä ja bitumia lisäämällä saadaan muovibitumiksi nimetty seossideaine. Muovin lisäyksellä pyritään parantamaan päällysteen deformaatio- ja kylmänkestävyysominaisuuksia. Näyttää siltä, että muovista kuumennettuna erittyvät höyryt rajoittavat muoviasfaltin käyttöä.

Ylijäämälasilla tarkoitetaan tässä lasimurskaa, jota ei voida hyödyntää lasivillan valmistuksessa. Ylijäämälasia on Suomessa käytetty mm. kaatopaikan kaasunkeräyskerrokseen. Suunnitelma-asteella on kuitenkin selvittää myös ylijäämälasin käyttömahdollisuudet tierakenteissa, joissa ylijäämälasin käyttö saattaa olla mahdollista mm. suodatin-kerroksessa ja stabiloituna muissakin kerroksissa.

4.3.8 Saastuneet maamateriaalit

Saastuneita maa-aineksia on kiinteytetty esimerkiksi betonoimalla ja käytetty jonkin verran mm. kaatopaikkateiden ja kompostointialueiden rakennekerroksissa. Toistaiseksi saastuneelle betonoidulle maalle on pyritty pikemminkin löytämään sopiva sijoituspaikka kuin käyttämään sitä varsinaisissa rakenteissa. Suunnitelmallista käyttöä vaikeuttaa osaltaan materiaalin saatavuuden ennakoimattomuus ja yleensä nopea käsittelytarve.

Ennen hyötykäytöstä päättämistä on aina selvitettävä saastuneen materiaalin haitta-ainepitoisuudet, materiaalille soveltuva betonointi- tai stabilointiresepti sekä haitta-aineiden mahdollinen liukeneminen kiinteytetystä tuotteesta. Saastuneen kiinteytetyn maamateriaalin soveltuvuuteen täyte- tai runkoaineeksi vaikuttavat maamateriaalin laadun ohella kiinteyttämällä sidotun haitta-aineen laatu ja määrä.

4.4 Kunnossapitotarpeen arviointi

Tien kunnossapitotarvetta arvioidaan kuntomuuttujien arvojen ja ennustetun kehittymisen perusteella. Näitä kuntomuuttujia ovat pituus- ja poikkisuuntainen epätasaisuus sekä vauriot. Tien pituussuuntaista epätasaisuutta kuvataan tien pituusprofiilista laskettavalla tunnusluvulla (IRI, International Roughness Index, yksikkö mm/m). Tien poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvataan yleensä urasyvyydellä (mm). Tien pinnalla havaittavat vauriot ovat seurausta liikenteen ja ilmaston kuormittavasta vaikutuksesta. Tien vaurioitumista voidaan selittää mm. rakenteen kuormituskestävyydellä.

Urautuminen on yleensä seurausta joko päällysteen kulumisesta nastarenkaiden käytön seurauksena tai raskaan liikenteen aiheuttamasta päällysteen deformatumisesta (pysyvästä muodonmuutoksesta). Nämä molemmat riippuvat lähes yksinomaan päällysteen ominaisuuksista, jolloin alempiin rakennekerroksiin sijoitetut sivutuotteet eivät merkittävästi vaikuta urautumiseen. Rakennekerroksissa ja pohjamaassa voi tapahtua pysyviä muodonmuutoksia ja siten pinnan urautumista, jolloin taas esim. kantavaan ja/tai jakavaan kerrokseen käytetyn tuhkan jäykkyydellä (ml. sitoutuminen) on merkittävä vaikutus urautumiseen.

Päällysrakenteen alaosan kerrosten ja pohjamaan pysyvät muodonmuutokset (painumat) voivat aiheuttaa lisäksi pituussuuntaista epätasaisuutta, johon vaikuttavat näihin kerrokseen käytettyjen sivutuotemateriaalien ominaisuudet. Päällysrakenteen alaosasta ja pohjamaasta aiheutuvan pituussuuntaisen epätasaisuuden korjaaminen on vaikeaa ja kallista.

Rakenteen vaurioitumista liikenteen vaikutuksesta selittää sidotun päällysteen alapinnan muodonmuutos, joka toistuu aiheuttaa rakenteen väsymisen ja siten vaurioitumisen. Päällysteen muodonmuutokseen vaikuttavat eniten päällysteen ja kantavan kerroksen paksuus ja jäykkyys, jota kuvataan rakennekerroksen kimmomodulilla. Täten päällysrakenteen yläosaan sijoitettujen sivutuotemateriaalien jäykkyys vaikuttaa rakenteen kuormituskestävyyteen.

Rakenteen vaurioitumiseen routanousun vaikutuksesta vaikuttaa roudan tunkeutumissyvyys, joka taas riippuu rakennemateriaalien lämmönjohtavuudesta ja rakennekerrosten paksuudesta.

Periaatteessa samat kuntomuuttajat kuvaavat rakenteen kuntoa riippumatta siitä, onko tie rakennettu perinteisistä materiaaleista vai sivutuotemateriaaleista. Tienpidon ohjelmoinnissa ja ohjauksessa käytettäviin HIPS- ja PMS-järjestelmiin kerätään toteutumätietoa tieverkon kunnosta mittaamalla eri kuntomuuttujia säännöllisin väliajoin. Rahojen allokointi ja päällystysohjelma (kohteiden priorisointi ja valinta) tehdään perustuen mitattuun kuntotietoon. Yksittäisen kohteen parantamistoimenpiteen mitoituksessa perustuu mitattuun vanhan rakenteen tilaan (kuntomuuttujien arvoihin).

Kuntomuuttujien kehittymistä ennustetaan kenttähavaintoihin perustuvilla malleilla. Mallit perustuvat aineistoon, jossa on käytetty perinteisiä rakennemateriaaleja. Ei ole olemassa luotettavaa seurantatietoa siitä, miten rakenteiden käyttäytyminen ja kunnossapitotarve muuttuvat käytettäessä sivutuotemateriaaleja.

Tien kunnossapitotarvetta käytettäessä sivutuotteita on arvioitava ensi vaiheessa samoilla malleilla kuin perinteisiäkin rakenteita. Mm. YGO- ja TPPT-ohjelmissa toteutettujen koerakenteiden pitkäaikaiseurannalla saadaan tietoa perinteisestä poikkeavien materiaalien ja rakenteiden käyttäytymisestä ja kunnossapitotarpeesta todellisissa kenttäolosuhteissa.

Tien kunnossapitotarpeen arviointi johtaa odotettavissa olevaan kestoikään, ts. arvioon ajankohdasta, jolloin tietty kunnossapitotoimenpide täytyy tehdä kuntomuuttujien arvon palauttamiseksi hyväksytylle tasolle. Kun tiedetään (tai arvioidaan) toimenpiteiden kustannukset, voidaan laskea eri rakenteille tarkasteluajanjaksona ennakoitavat kustannukset. Ne diskontataan nykyarvoon taloudellista vertailua varten.

Tieto kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksesta kestoikään, ts. arvio siitä, milloin pitää tehdä toimenpiteen jälkeen seuraava toimenpide, perustuu kokemukseräiseen tietoon, joka on hajanaista ja osin puutteellista. Tietoa toimenpiteiden vaikutuksesta kestoikään pyritään hankkimaan TPPT:n elinkaarikustannusanalyysi-projektissa.

4.5 Rakenteen kierrätettävyys ja jäännösarvo

Rakenteen kierrätettävyyttä ja jäännösarvoa tarkasteltaessa on arvioitava, mitä rakenteelle tai sen osille tapahtuu käytön jälkeen. Rakenteen purkua ja kierrätettävyyttä arvioidaan jäännösarvon (rakenteeseen jäävän osan), purkamisen ja loppusijoittamisen aiheuttamien kustannusten ja ympäristövaikutusten sekä kierrätettävyyden (joko samassa kohteessa tai muualla) perusteella.

Perinteisiä materiaaleja käytettäessä (sitomattomat rakennekerrokset) rakennekerroksia on harvoin purettu tai niiden käsittely ja loppusijoitus ei ole aiheuttanut erityistoimenpiteitä. Sivutuotemateriaaleilla tulee tarkasteltavaksi rakenteiden mahdollinen purkaminen sekä materiaalien käsittely ja loppusijoitus. Uusiomateriaaleista tähän mennessä toteutettuja kohteita ei ole vielä purettu, jolloin olisi jouduttu arvioimaan loppusijoituksen ympäristö- ja kustannusvaikutuksia. Päällystettä voidaan uudelleenkäyttää jopa useaan kertaan. Pohjarakenteet jäävät yleensä paikalleen, mutta rakennekerrokset voidaan joissain tapauksissa joutua purkamaan.

Rakenteella on tarkastelujakson lopussa jäännösarvo, joka koostuu sen *rakenteellisesta jäännösarvosta* ja *taloudellisesta jäännösarvosta*. Tien rakenteellinen jäännösarvo koostuu kuormitus-, routa- ja painumakestävyuden jäännösarvosta, ja jäännösarvo muuttuu tien kunnan muuttuessa. Jäännösarvoa arvioidaan sen mukaan, tarvitaanko tarkastelujakson lopussa uudelleenpäällystys, rakenteen parantaminen vai pohjarakenteiden parantaminen. Jäännösarvo muutetaan markoiksi suhteessa investointikustannuksiin seuraavalla kaavalla:

Jäännösarvo rahassa = jäännösarvo(%) x investointikustannus

Taloudellinen jäännösarvo diskontataan tarkastelun alkamisajankohtaan (yleensä nykyhetkeen) nykyarvomenetelmällä ja otetaan taloudellisessa analyysissä huomioon omana kohtanaan. Koska taloudellinen jäännösarvo määritetään karkealla tasolla, sitä ei kannata yhdistää tarkemmin määritettyjen investointi- ja toimenpidekustannusten kanssa taloudellisuusanalyysissä.

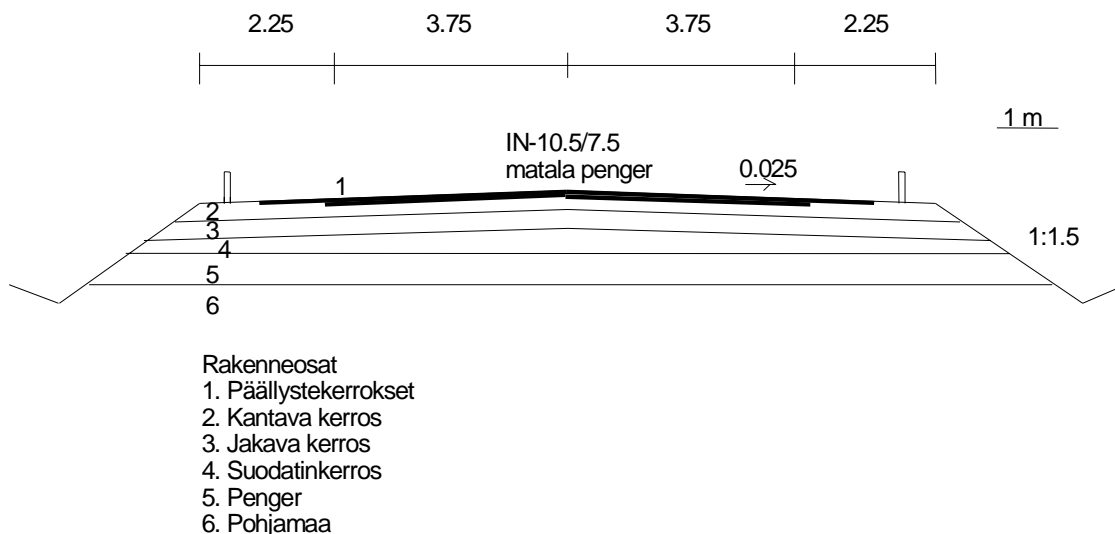
5. Esimerkkirakenteet

Elinkaaritarkasteluissa läpikäytävien kuvitteellisten rakenteiden materiaaleiksi on valittu perinteiset materiaalit (vertailurakenne), lentotuhka, betonimurske ja masuunikuona (masuunikuona ja -hiekkä). Tarkastelun lähtökohta on, että päällysrakennevaihtoehdot tarkastellaan erikseen ja pohjarakennevaihtoehdot tarvittaessa erikseen.

5.1 Päällysrakennevaihtoehdot

Päällysrakennevaihtoehdoissa maapohja on oletettu sellaiseksi, että rakennekerrokset voidaan tehdä maapohjalle suoraan pintamaanpoiston jälkeen. Pohjamaana on routiva hiekkamoreeni.

Tarkasteltavaksi rakenteeksi on valittu päätiepoikkileikkaus IN-10.5/7.5. Poikkileikkauksen mitat on esitetty kuvassa 4. Päällysrakenneluokan 1 AB mukaisen rakenteen taivokeantavuus päällysteen päältä on 420 MPa.



Kuva 4. Tarkasteluun valitun poikkileikkauksen mitat ja rakennekerrokset matalalla penkereellä.

Routaolosuhteet arvioidaan keskivaikeiksi ja mitoittavaksi pakkasmääräksi 30 000 h°C. Tällöin routimattomien kerroksien yhteispaksuuden tulee Tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaan olla vähintään 900 mm keskivaikeilla routaolosuhteilla.

Esimerkkirakenteiden kuormitusmitoitus on tehty perinteisenä kantavuusmitoituksena. Masuunihiekkarakenteen mitoitus on mahdollista tehdä myös analyttisellä mitoitusmenetelmällä tielaitoksen masuunihiekan käytön suunnitteluohjeiden pohjalta (Tielaitoksen

selvityksiä 23/1997). Esimerkkirakenteiden rakennekerrokset ja ominaisuudet routivalla pohjamalla esitetään taulukoissa 8–15 ja kuvissa 5a ja 5b.

Taulukko 8. Rakennekerrokset perinteisiä materiaaleja (rakenne V1) käytettäessä. Kokonaispaksuus riittää keskivaikeisiin routaolosuhteisiin (paksuus yli 900 mm).

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	427
Kantava kerros	Murske 0–35	250	350	178
Jakava kerros	Sora	250	200	89
Suodatinkerros	Hiekka	250	200	89
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		960		

Taulukko 9. Rakennekerrokset lentotuhkaa (rakenne LT1) käytettäessä. Kokonaispaksuus riittää keskivaikeisiin routaolosuhteisiin (paksuus yli 900 mm).

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 16	50	2 500	423
Kantava kerros	BST	150	1 500	371
Jakava kerros	LT + YSE 2 %	650	400	194
Suodatinkerros	Hiekka	200	70	34
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		1 050		

Lentotuhkarakenteessa LT1 tuhkerokoksen maamateriaaleja jonkin verran pienempää lämmönjohtavuutta ei ole otettu huomioon kerrospaksuutta pienentävänä tekijänä, koska rakennekerrokset määräytyvät kantavuuden perusteella ja 200 mm suodatinkerros katsotaan välttämättömäksi. Päällystepaksuudeltaan muiden rakenteiden kanssa vertailukelpoisen lentotuhkarakenteen (rakenne LT2) rakennekerrokset esitetään taulukossa 10. Rakenteen kokonaispaksuus jää alle 900 mm:n, mutta lentotuhkan maamateriaaleja paremman lämmöneristävyyden (35 cm lentotuhkaa vastaa noin 50 cm sora) vuoksi kerrospaksuus on riittävä.

Tarkasteluihin sisällytettiin myös lentotuhkarakenne, jossa sementti jätettiin pois lentotuhkakerroksesta (rakenne LT3, taulukko 11). Rakenne vastasi muuten rakennetta LT2. Tarkastelu tehtiin, koska haluttiin tutkia, kuinka suuri vaikutus sementillä on kuormituksiin.

Taulukko 10. Rakennekerrokset kerrospaksuudeltaan muiden materiaalien kanssa vertailukelpoisessa lentotuhkarakenteessa (rakenne LT2).

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	439
Kantava kerros	Murske 0–35	150	350	185
Jakava kerros	LT + YSE 2 %	350	400	135
Suodatinkerros	Hiekka	200	70	34
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		860		

Taulukko 11. Lentotuhkarakenne LT3, jossa sementti on jätetty pois tuhkakerroksesta.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus, mm
Päällyste	AB 20/120	160
Kantava kerros	Murske 0–35	150
Jakava kerros	LT	350
Suodatinkerros	Hiekka	200
Pohjamaa	Hiekkamoreeni	
Kokonaispaksuus		860

Taulukko 12. Rakennekerrokset betonimurskerakenteessa (rakenne BM1).

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	(429) 453
Kantava kerros	Betonimurske 0–50	100	1 000	193
Jakava kerros	Betonimurske 0–50	150	1 000	128
Suodatinkerros	Hiekka (350)	550	70	50
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		960		

Kantavuuden puolesta suodatinkerroksen paksuus taulukon 11 betonimurskerakenteessa voisi olla 350 mm. Routimisen rajoittamiseksi suodatinhiekkakerroksen paksuudeksi on kuitenkin otettu 550 mm. Lisäämällä betonimurskekerroksen paksuutta voidaan vähentää asfalttipinnoitteen paksuutta, jolloin rakennekerrokset ovat taulukossa 13 esitetyn mukaiset (BM2).

Taulukko 13. Rakennekerrokset betonimurskerakenteessa BM2, jossa on käytetty rakennetta BM1 paksumpia betonimurskekerroksia.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 20/120	80	2 500	446
Kantava kerros	Betonimurske 0–50	200	1 000	330
Jakava kerros	Betonimurske 0–50	200	1 000	152
Suodatinkerros	Hiekka (350)	450	70	46
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		930		

Taulukko 14. Rakennekerrokset masuunikuonamursketta ja -hiekkaa käytettäessä.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	474
Kantava kerros	Masuunikuonamurske	100	600*	207
Jakava kerros	Masuunihiekka	300	600*	159
Suodatinkerros	Hiekka (350)	350	70	49
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		860		

* Masuunihiekan suunnitteluohjeiden mitoituskäyrästöissä masuunihiekkakerroksen ja sen yläpuolisen masuunimurskekerroksen yhteispaksuudella käytettävä moduulin arvo.

Kerrospaksuudet määräytyvät routimisen rajoittamisesta. Mikäli masuunihiekan eristävyyttä halutaan hyödyntää ja tehdään myös suodatinkerros masuunihiekasta, voidaan rakennetta ohentaa 15 cm. Kerrospaksuudet määräytyvät kantavuuden mukaan, kun osa masuunihiekkakerroksesta on laskettu toimivaksi suodatinkerroksena (alennettu moduuli). Tällöin rakennekerrokset ovat taulukossa 15 esitetyn mukaiset (rakenne MK).

Edellä esitettyjä päällysrakenteita voidaan käyttää lähes sellaisenaan myös vertailtaessa paremmin kantavalle ja routimattomalle pohjamaalle (esim. routimaton hiekka, E=50 MPa) tehtyjä tierakenteita, jos kunkin rakennekerroksen vaikutukset elinkaaritarkaste-

lussa esitetään erikseen. Kantavalla pohjalla suodatinkerros (hiekkä) ja pengerrakenne (huonompilaatuinen hiekkä) jäävät pois kaikista rakenteista. Muihin rakennekerroksiin kantavan pohjamaan vaikutukset ovat verraten pieniä (vertailurakenteen jakava kerros ohenee 5 cm; lentotuhkarakenteessa lentotuhkakerroksen paksuus ohenee 10 cm; betonimurskerakenteissa kerrosten paksuudet eivät muutu ja masuunihiekkarakenteessa masuunihiekan paksuus alenee 15 cm). Rakenteet kantavalla pohjamaalla on esitetään taulukoissa 16–20.

Taulukko 15. Rakennekerrokset masuunikuonarakenteessa MK, jossa osa masuunihiekkarakenteesta on laskettu suodatinkerrokseksi.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	Mpa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	430
Kantava kerros	Masuunikuonamurske	100	600	179
Jakava kerros	Masuunihiekkä	250	600	133
Suodatinkerros	Masuunihiekkä	200	100	38
Pohjamaa	Hiekkamoreeni		20	20
Kokonaispaksuus		710		

Taulukko 16. Rakennekerrokset kantavalla pohjamaalla perinteisiä materiaaleja käytettäessä.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	Mpa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	428
Kantava kerros	Murske 0–5	250	350	178
Jakava kerros	Sora	200	200	90
Pohjamaa	Hiekkä		50	50
Kokonaispaksuus		610		

Taulukko 17. Rakennekerrokset kantavalla pohjamaalla, kun lentotuhkaa käytetään päällystepaksuudeltaan muiden rakenteiden kanssa vertailukelpoisessa rakenteessa.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	Mpa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	439
Kantava kerros	Murske 0–35	150	350	185
Jakava kerros	LT + YSE 2 %	250	400	134
Pohjamaa	Hiekkä		50	50
Kokonaispaksuus		560		

Taulukko 18. Rakennekerrokset kantavalla pohjamaalla betonimursketta käytettäessä.

Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	Mpa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	453
Kantava kerros	Betonimurske 0–50	100	1 000	193
Jakava kerros	Betonimurske 0–50	150	1 000	128
Pohjamaa	Hiekka		50	50
Kokonaispaksuus		410		

Taulukko 19. Rakennekerrokset kantavalla pohjamaalla käytettäessä betonimursketta ja taulukossa 18 esitettyä ohuempaa asfalttipinnoitetta.

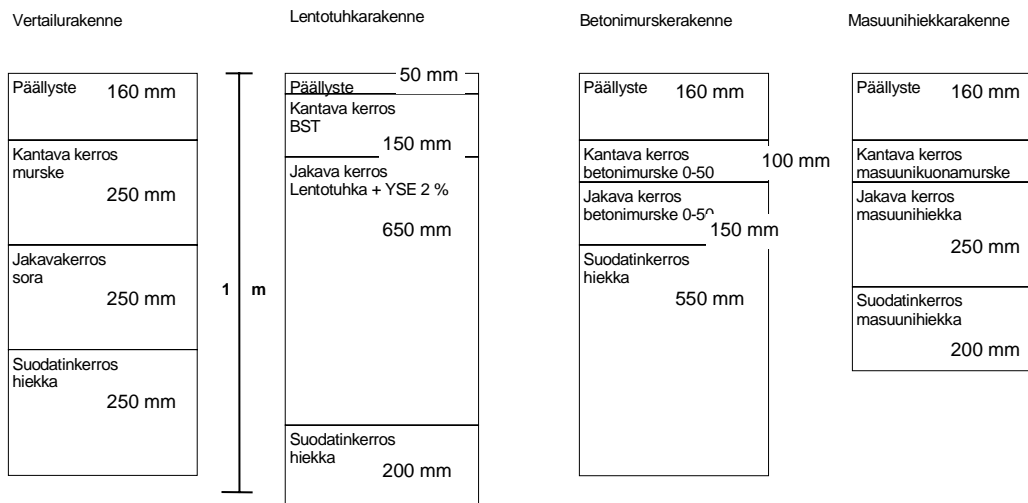
Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	Mpa
Päällyste	AB 20/120	80	2 500	458
Kantava kerros	Betonimurske 0–50	200	1 000	341
Jakava kerros	Betonimurske 0–50	200	1 000	161
Pohjamaa	Hiekka		50	50
Kokonaispaksuus		480		

Taulukko 20. Rakennekerrokset kantavalla pohjamaalla masuunikuonamursketta ja masuunihiekkaa käytettäessä.

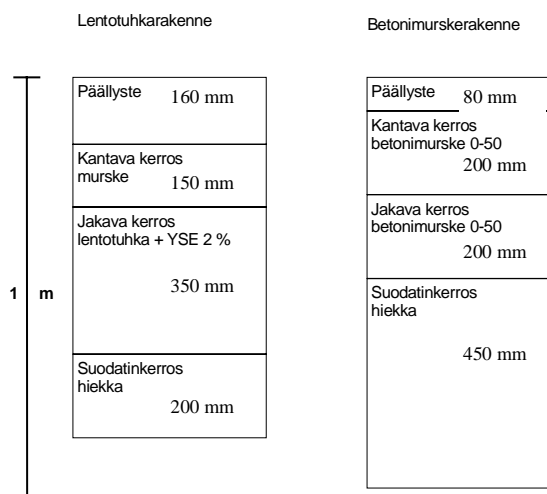
Kerros	Materiaali	Kerrospaksuus ja moduuli		Pinnan kantavuus
		mm	MPa	MPa
Päällyste	AB 20/120	160	2 500	507
Kantava kerros	Masuunikuonamurske	100	600	228
Jakava kerros	Masuunihiekka	300*	600	179
Pohjamaa	Hiekka		50	50
Kokonaispaksuus		560		

* masuunihiekkakerroksen minimipaksuus

Ylärakennevaihtoehdot



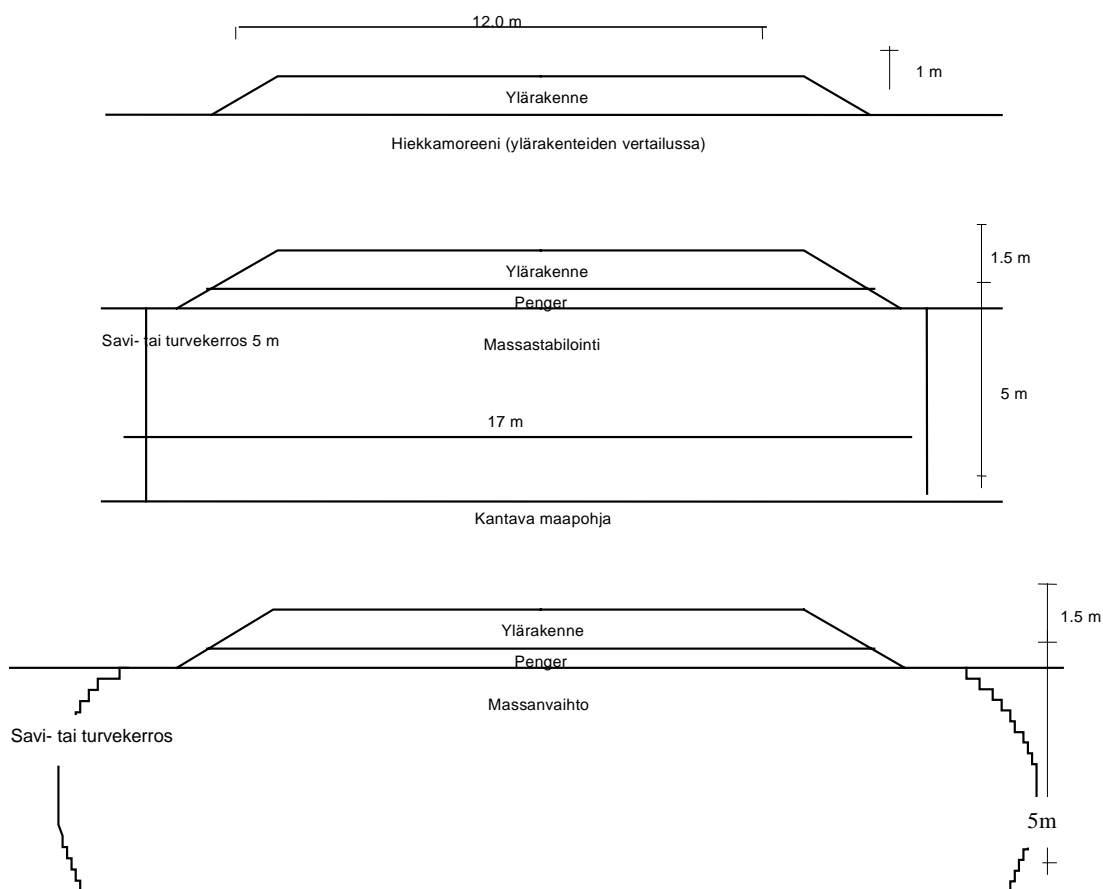
Kuva 5a. Esimerkkitarkastelujen päällysrakennevaihtoehdot: rakenteet V1, LT1, BM1 ja MK.



Kuva 5b. Esimerkkitarkastelujen päällysrakennevaihtoehdot: rakenteet LT2 (LT3) ja BM2.

5.2 Pohjarakennevaihtoehdot

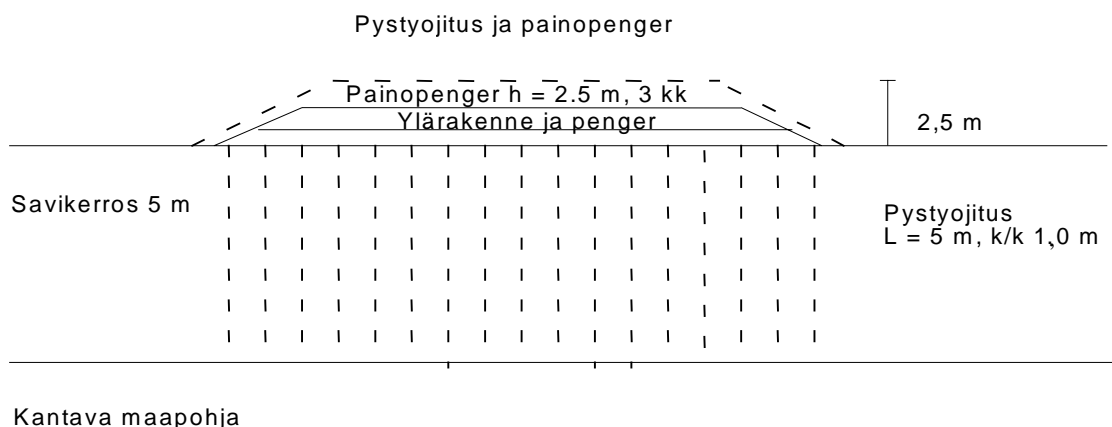
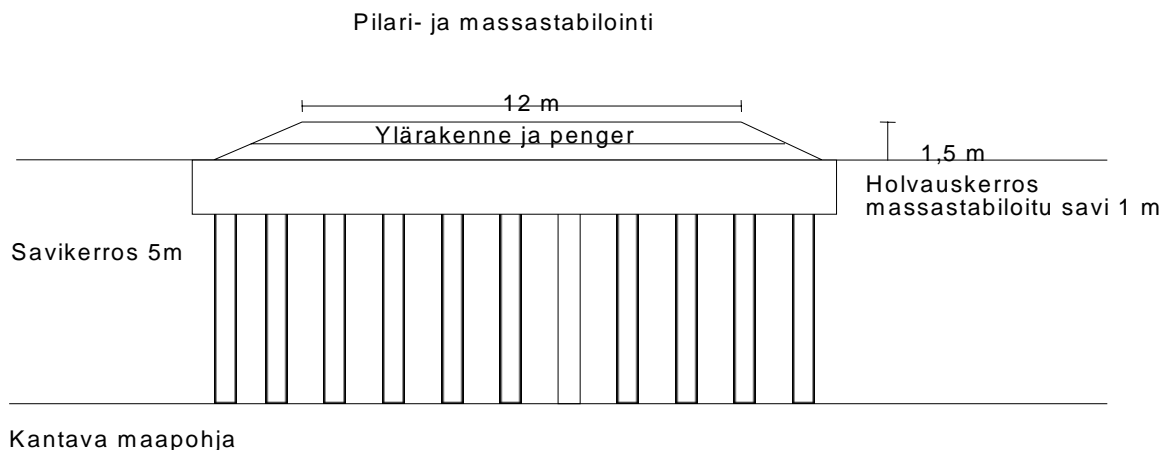
Pohjarakennevaihtoehtojen tarkastelussa rakennuspaikan maapohjan oletetaan olevan 5 metrin syvyyteen asti heikosti kantavaa ja painuvaa, pehmeää savea (tai turvetta). Tämän alla maapohja on kantavaa. Pohjarakennevaihtoehtoina tarkastellaan yleisimpiä matalalla pehmeiköllä ja syvällä pehmeiköllä käytettäviä rakennevaihtoehtoja. Molemmissa tapauksissa pehmeikön syvyys on kuitenkin sama vertailun helpottamiseksi. Pohjarakennevaihtoehdot ovat kuvissa 6 ja 7.



Kuva 6. Massastabilointi ja massanvaihto.

Matala pehmeikkö

Kantavuuden parantamiseksi ja painumien vähentämiseksi suoritetaan joko massanvaihto kaivamalla (täyttömateriaalina riittävän kantava, mutta mahdollisesti routiva maamateriaali, esim. edellä esitetty hiekkamoreeni, joka oletetaan saatavan muualta ko. kohteesta) tai massastabiloimalla savikerros (esim. sementillä 100 kg/m^3). Massanvaihtotapauksessa poiskaivettu savi kuljetetaan kaatopaikalle.



Kuva 7. Syvä- (pilari-) ja massastabilointi sekä pystyjoitus.

Tasausviivan nostamiseksi molemmissa pohjarakennevaihtoehdoissa maanpinnalle tehdään 0,5 m paksuinen pengerr suodatinhiekkaa heikkolaatuisemmasta materiaalista ($E = 20\text{--}30 \text{ MPa}$). Pengerr ei näin vaikuta esitettyjen päällysrakennevaihtoehtojen rakenteisiin, jolloin niitä voidaan käyttää sellaisenaan yhdessä eri pohjarakennusvaihtoehtojen kanssa.

Syvä pehmeikkö

Syvemmän pehmeikön osalta tarkastellaan pilaristabilointia (sementtimäärä esim. 120 kg/m^3) ja pystyjoitusta. Näissäkin tapauksissa pohjasuhteet oletetaan sellaisiksi, että pohjavahvistustoimenpiteet eivät merkittävästi vaikuta edellä esitettyihin ylärakenteisiin. Tien tasausviivaa nostetaan näissäkin tapauksissa edellä esitettyllä 0,5 m paksuisella penkereellä.

Liitteissä 1 ja 2 esitetään rakenteissa olevien rakennekerrosten paksuudet ja tilavuudet sekä käytettyjen materiaalien massat ja tiheydet varastoinnin ja kuljetusten aikana sekä tiivistettynä.

5.3 Esimerkkirakenteiden kunnossapitotarpeen ja jäännösarvon arviointi

Seuraavassa esitetään esimerkkirakenteille 50 vuoden käyttöajalle suuntaa-antava arvio siitä, miten usein kunnostustoimia tarvitaan, mitä nämä kunnostustoimet ovat, millä menetelmällä ne toteutetaan ja mitä tapahtuu poistettavalle materiaalille (esimerkiksi pinnoitteiden kierrätysaste).

Lähtötiedot:

Liikenne: Päälysrakenneluokan 1 AB mitoittava liikennemäärä on $5-0 \times 10^6$ kuormituskertaa 20 vuoden aikana. Tämä vastaa (500–)1 000 raskasta ajoneuvoa/vrk leveyskertoimella 0,4. Riippuen raskaan liikenteen osuudesta, esim. 10 %, tämä vastaa keskimääräistä vuorokausiliikennettä (KVL) noin 7 000.

Ilmasto: Pakkasmäärä 30 000 h°C

Taulukko 21. Rakennekerrokset ja pohjamaa, referenssirakenne

	Moduuli, MN/m ²	Kerrospaksuus, mm
Päällyste, AB	2 500	160
Kantava kerros	350	250
Jakava kerros	200	250
Suodatinkerros	70	300
Pohjamaa	20	

Urautuminen

Urat aiheuttavat toimenpiteen noin seitsemän vuoden välein (KVL:n perusteella). Toimenpiderajana on 20 mm:n maksimiura. Urien aiheuttama toimenpidetarve hoidetaan remixer-menetelmällä.

Vaurioituminen

Rakenteellisen kunnan palauttamiseksi joka kolmas toimenpide tehdään uudelleenpäällystyksenä. Taulukossa 22 esitetään yhteenveto arvioidusta toimenpidetarpeesta 50 vuoden aikana:

Taulukko 22. Tarvittavat kunnostustoimenpiteet 50 vuoden aikana.

Aika	Toimenpide	Menetelmä	Hinta (nyky)
0 vuotta	rakentaminen	referenssirakenne	
7 vuotta	remixer	jyrsintä 30 mm + massapintausta 50 kg/m ²	20 mk/m ²
14 vuotta	remixer	jyrsintä 30 mm + massapintausta 50 kg/m ²	20 mk/m ²
21 vuotta	uudelleenpäällystys	massan lisäys 100 kg/m ²	25 mk/m ²
28 vuotta	remixer	jyrsintä 30 mm + massapintausta 50 kg/m ²	20 mk/m ²
35 vuotta	remixer	jyrsintä 30 mm + massapintausta 50 kg/m ²	20 mk/m ²
42 vuotta	uudelleenpäällystys	massan lisäys 100 kg/m ²	25 mk/m ²
49 vuotta	remixer	jyrsintä 30 mm + massapintausta 50 kg/m ²	20 mk/m ²

Jyrsinnässä poistettava materiaali kierrätetään 100-prosenttisesti takaisin rakenteeseen.

Tasaisuus

Rakenteen tasaisuudessa ei oleteta rakenteen käyttöaikana tapahtuvan sellaisia korjaustarpeen aiheuttavia muutoksia, jotka eivät korjautuisi edellä esitetyillä toimenpiteillä (korkealuokkainen tie).

Jäännösarvo

Pintakunnon (urien ja tasaisuuden) suhteen rakenteella on täysi jäännösarvo, koska tarkastelujakson lopussa on juuri arvioitu tehdyn pintakuntomuutujat alkuperäiseen arvoonsa palauttava toimenpide. Menetelmät rakenteellisen jäännösarvon määrittämiseksi kehitetään TPPT-projektissa E6 Elinkaarikustannusanalyysi tulevina vuosina.

6. Tarkastelun rajaukset

6.1 Toiminnallinen yksikkö

Ympäristökuormitukset laskettiin vaihtoehdoissa toiminnallista yksikköä kohden. Toiminnalliseksi yksiköksi valittiin päällysrakenteiden tarkastelussa yhden kilometrin pituinen 12 metriä leveä tie. Pohjarakenteiden toiminnalliseksi yksiköksi valittiin 17 m leveä 5 m syvä yhden kilometrin pituinen tienpohja. Läjitysvaihtoehdoissa toiminnallinen yksikkö oli läjitykseen viedyn sivutuotteen massamäärä, joka oli sama kuin vastaavaan tierakenteeseen käytettävä massamäärä.

6.2 Tarkastelu-aika

Tarkasteluajaksi valittiin 50 vuotta, mikä voidaan olettaa normaaliksi käyttöajaksi tierakenteelle. Tien pintakerroksen käyttöaika on lyhyempi ja sitä joudutaan korjaamaan useaan kertaan tarkastelujakson aikana. Tarkastelu-aika on sama kaikissa vaihtoehdoissa. Rakenne voi jäädä paikoilleen tämän tarkastelujakson jälkeenkin tai se voidaan sijoittaa uudelleen (esim. kierrätykseen tai kaatopaikalle). Toiminta tarkasteluajan jälkeen rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle.

6.3 Tarkasteltavat työvaiheet

Tarkastelussa ovat mukana kaikki tierakenteen elinkaaren merkittävät vaiheet, joihin kuuluvat rakentamisessa käytettävien materiaalien tuotanto ja esikäsittely, sijoitus tierakenteisiin ja rakenteen käyttö. Tarkemmin rakentamisen ja käytön päävaiheita on esitetty kuvassa 28. Ne toimintavaiheet, joilla ei ole merkitystä rakenteiden vertailussa, on jätetty pois tarkastelusta. Tällaisia ovat mm. raivaustyöt ja tien käyttöön liittyvät toimet, kuten kaistamaalaukset, liikennemerkkien ja valojen asennukset, suolaus, hiekoitus jne.

6.4 Tarkasteltavat ympäristökuormitukset

Tarkasteltaviksi pyrittiin valitsemaan kaikki tierakenteiden ja niihin käytettävien materiaalien valmistuksessa ja rakenteiden käytön aikana oleellimmat ympäristökuormitukset. Kuormitukset jakautuvat viiteen pääryhmään (esitetty tarkemmin taulukossa 46):

- resurssien käyttö - luonnonraaka-aineet, sivutuotteet, energia, polttoaineet ja maan käyttö
- päästöt maaperään ja vesistöihin - materiaaleista liukenevat aineet, COD ja N

- päästöt ilmaan - CO₂, NO_x, SO₂, VOC, CO, hiukkaset
- jätteet - inertti jäte
- muut kuormitukset - melu.

6.5 Tarkastelun alueellinen laajuus

Tarkastelussa on käytetty ensisijaisesti keskimääräistä suomalaista tietoa. Kansainvälisiä tietoja käytettiin, jos muuta ei ollut saatavissa. Työkoneiden käyttöaikojen, energian ja polttoaineen kulutusten ja päästöjen laskeminen on esitetty erillisessä raportissa (Eskola 1998). Raportista löytyvät myös kaikki laskennassa käytetyt tietolähteet.

6.6 Sivutuotteet

Lähtökohtana oli, että sivutuotteiden tuotantovaiheessa syntyviä kuormituksia ei lasketa mukaan tarkasteluun, koska sivutuotteita (toisen prosessin jätteitä) syntyy riippumatta siitä, onko niille käyttökohde vai ei. Koska prosessin kuormituksia ei elinkaariarvioinneissa jaeta jätteiden tuotannolle, sivutuotteet, joiden hyötykäytön vaihtoehtona voi olla läjitysalue-sijoitus, ovat tuotantoprosessin kuormitusten allokoinnissa rajatapaus.

Lentotuhkan elinkaari rajattiin alkavaksi tuotantolaitoksen siilosta. Lentotuhkan erotusprosessit ja siirto siiloon jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Lentotuhkan käsittelyyn (veden ja lisäaineiden sekoitukseen) käytettyjen laitteiden päästöt laskettiin laitoksen päästötietojen perusteella laitteiden energiankulutuksen suhteessa. Päästötietoina käytettiin keskimääräisiä sähköntuotannon päästöjä Suomessa vuonna 1995 (Pirilä et al. 1997). Lentotuhkan koostumus vaihtelee jonkin verran käytetyn hiilen laadun vaihtelun takia. Tätä vaihtelua ei kuitenkaan pystytty ottamaan huomioon tässä tutkimuksessa.

Masuunikuonamurskeen elinkaari rajattiin alkavaksi kuonapenkasta, johon sula kuona on kaadettu jäähtymään. Masuunihiekan elinkaari rajattiin alkavaksi varastokasasta. Betonimurskeen elinkaari rajattiin alkavaksi sekalaisesta betonijätteestä, joka on tuotu murskaamolle.

6.7 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. Asphaltista otettiin huomioon koko elinkaari raaka-aineiden otosta ja jalostuksesta päällystykseseen ja tien kunnossapitoon.

6.8 Massat ja tilavuudet

Liitteessä 1 esitetään 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, Jylhä 1992). Lentotuhkaseosten, masuunikuonan ja betonimurskeen tilavuudet eri työvaiheissa laskettiin käyttämällä tilavuuspainoja.

6.9 Läjitys

Läjitystä käsiteltiin lentotuhkan ja betonimurskeen hyötykäytön vaihtoehtona. Tällöin oletettiin, että lentotuhkan sijoittaminen läjitysalueelle tapahtuu nk. viipalemenetelmällä, jossa jäte sijoitetaan louheesta rakennettuihin allasrakenteisiin. Allasrakenteiden koko valittiin samaksi kuin Vantaan Pitkäsuon täyttömäellä. Betonijäte oletettiin sijoitettavaksi sellaisenaan läjitysalueelle. Läjitetyn kerroksen paksuudeksi oletettiin 10 m.

6.10 Käytetyt koneet ja laitteet

Työkoneiden käyttöaikoja laskettaessa jouduttiin tekemään monia oletuksia, koska työvaiheet voidaan suorittaa monella tavalla erilaisilla ja eritehoisilla 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 niihin vaikuttavat mm. paikalliset olosuhteet, konetyyppi, koneen kunto ja ikä, käyttäjän tai kuljettajan käyttötavat ja käsiteltävät materiaalit. Tutkimuksessa oletettiin, että työkoneet ja kuljetusvälineet saavat energiansa dieselpolttoaineesta. Työkoneiden energian- ja polttoaineenkulutus laskettiin käyttöaikojen ja Purasen (1992) julkaisusta saatujen kullekin koneelle laskettujen keskimääräisen nimellistehon, käyttötehon ja ominaiskulutuksen avulla. Koneiden päästöt laskettiin käyttäen päästökertoimia, jotka olivat peräisin ruotsalaisista tutkimuksista (Stenström 1989).

Muut työkoneiden elinkaaren ajalta aiheutuneet kuormitukset (esim. työkoneiden valmistus) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Myös poltto- ja räjähdysaineiden valmistus

ja kuljetukset jätettiin myös tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden vaikutus oletettiin tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömäksi. Sähköllä toimivien laitteiden päästöt laskettiin niiden sähkön kulutuksesta käyttäen keskimääräisiä sähköntuotannon päästöjä Suomessa (Pirilä et al. 1997).

6.11 Kuljetukset

Kuljetusmatkat vaihtelevat paikkakunnittain erittäin paljon. Koska pääkaupunkiseudulla tehdään suuri osa Suomen maarakentamisesta, tässä tutkimuksessa käytettiin hiekan, soran, murskeen ja lentotuhkan kuljetusmatkoina arvioituja keskimääräisiä kuljetusmatkoja pääkaupunkiseudulla. Kiviainekset joudutaan tuomaan usein melko kaukaa. Kalliomurskeet tuodaan 0–20 km päästä ja hiekat ja sorat 40–70 km päästä (Rasimus 1998). Tässä tutkimuksessa oletettiin, että murske tuodaan 10 km:n päästä ja hiekka ja sora 50 km:n päästä. Lentotuhkan kuljetusmatkaksi oletettiin 10 km. Muiden raaka-aineiden kuljetusmatkoina käytettiin arvioituja keskimääräisiä kuljetusmatkoja Suomessa. Masuunikuonan kuljetusmatkaksi oletettiin 50 km, betonimurskeen 10 km, sementin 100 km ja asfaltin 10 km. Massojen kuljetusmatkan läjitysalueelle oletettiin olevan 10 km.

Kuljetukset oletettiin suoritettavaksi 40 tonnin perävaunullisilla kuorma-autoilla. Ainoastaan asfaltti kuljetetaan 15 tonnin kuorma-autolla. Sementti kuljetetaan 40 tonnin säiliöautolla. Lisäksi oletettiin, että kiviainekset ja tuhka oli kustutettu pölyämisen estämiseksi. Koska kuljetettavien kiviainesten ja tuhkamassojen pölyämisestä ei löytynyt tietoja, se jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Kuljetusten pakokaasupäästöt ja polttoaineen kulutus laskettiin käyttämällä päästökerroimia (Mäkelän *et al.* 1996). Kuljetusten energiankulutus saatiin muuntamalla polttoaineen kulutus energian kulutukseksi käyttämällä muuntokerrointa (Mäkelä 1998). Muut kuorma-autojen elinkaaren ajalta aiheutuneet kuormitukset (esim. autojen valmistus) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

6.12 Tien käyttö

Liikenteen aiheuttamat kuormitukset tien käytön aikana jätettiin varsinaisen elinkaari-tarkastelun ulkopuolelle, koska olemassa olevilla tiedoilla ei pystytty osoittamaan, että eri vaihtoehdoilla olisi tässä suhteessa eroa. Liikenteen aiheuttamat kuormitukset ovat kuitenkin vertailun vuoksi tulosten tarkastelun yhteydessä taulukossa 42. Liikenteen aiheuttamat kuormitukset laskettiin olettaen tien liikennemääräksi 7 000 ajoneuvoa/vrk, joista 1 000 oli raskaita ajoneuvoja.

Tien käytön aikainen kunnossapito, joka sisältää tien korjauksista aiheutuvat kuormitukset, sisällytettiin tarkasteluun. Muut tien kunnossapidosta (esim. suolauksesta ja hiekoituksesta) aiheutuvat kuormitukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

6.13 Tiedon laatu

Tutkimus tehtiin saatavilla olevia tietoja käyttäen. Ensisijaisesti pyrittiin käyttämään suomalaista tietoa ja kansainvälistä tietoa vain, jos kotimaista aineistoa ei ole saatavissa. Tiedon hankinta osoittautui joskus vaikeaksi. Tähän oli syynä esimerkiksi se, ettei kyseisiä asioita ollut tutkittu tai mitattu. Tietojen luotettavuus oli joskus myös epävarmaa, koska tiedot perustuivat suppeaan aineistoon. Taulukossa 23 on esitetty eri toimintavaiheiden tai raaka-aineiden päätielähteet.

Taulukko 23. Päätielähteet eri toimintavaiheissa tai raaka-aineilla.

Toimintavaihe	Tietolähde
Lentotuhkan varastointi ja lastaus	Helsingin Energia (Oasmaa 1996)
Lentotuhkan kuljetukset ja sijoitus maarakenteisiin	Lohja Rudus (Rämö 1997)
<i>Lentotuhkan sijoitus kaatopaikalle</i>	<i>Helsingin Energia (Oasmaa 1996)</i> <i>Blomster 1989</i> <i>Markkanen 1996</i> <i>Arovaara 1996</i>
Kallion louhinta	<i>Lemminkäinen (Ruostetoja 1996)</i>
Hiekan ja soran otto	Lohja Rudus (Rasimus 1996)
Kiviainesten murskaus	<i>Lemminkäinen (Ruostetoja 1996)</i> <i>Tielaitos 1994</i> <i>Tielaitos 1995</i>
Kiviainesten kuljetukset	<i>Lohja Rudus (Rasimus 1998)</i>
Tienrakennus	RIL 156 1995
Masuunikuona	<i>Rautaruukki (Mäkikyrö 1998)</i>
Betonimurske	<i>Lohja Rudus (Määttänen 1998)</i>
Sementti	<i>Häkkinen ja Mäkelä 1996</i> <i>Finnsement (Lundström 1998)</i>
Asfaltti	<i>Häkkinen ja Mäkelä 1996</i> <i>IVL (Stripple 1995)</i>
Pystyjoitus	<i>Kaitos Oy 1998</i> <i>Geotechnics Holland BV 1998</i> <i>Containerships 1998</i>

Sivutuotteita koskevan tiedon saatavuutta rajoittaa hyötykäytön vakiintumattomuus. Esimerkiksi tuhkarakentamisen pölypäästöjä ollaan vasta tutkimassa. Lentotuhkan käytön pölypäästöt olisivat tärkeitä, koska pöly sisältää runsaasti terveydelle erittäin haitallisiksi katsottuja pienhiukkasia.

Tehdyillä rajauksilla voidaan 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.

7. Ympäristökuormitukset ja ympäristövaikutukset

Tarkasteltavat päällysrakennevaihtoehdot olivat:

- 1 lentotuhkarakenne LT1
- 2 lentotuhkarakenne LT2
- 3 lentotuhkarakenne LT3 (LT2 ilman sementtilisäystä)
- 4 betonimurskerakenne BM1
- 5 betonimurskerakenne BM2
- 6 masuunikuonarakenne MK
- 7 vertailurakenne V1 (perinteiset materiaalit).

Lentotuhkan ja betonimurskeen tierakennuskäytön vaihtoehtona tarkasteltiin läjitystä. Jokaiselle tuhka- ja betonimurskerakenteelle oli oma vertailuvaihtoehdonsa (LT1L, LT2L, BM1L ja BM2L).

Tarkasteltavat pohjarakennevaihtoehdot olivat:

- 1 massanvaihto
- 2 massastabilointi
- 3 pilaristabilointi + holvauskerros massastabiloidusta savesta
- 4 pystyjoitus.

Ympäristökuormitukset on laskettu kullekin rakennevaihtoehdolle vaiheittain rakenteessa käytettävien materiaalmäärien ja toimintavaiheittaisten ympäristökuormitusten perusteella.

7.1 Raaka-aineiden kulutus

7.1.1 Päällysrakennevaihtoehdot

Tarkasteltavissa tierakenteissa on käytetty teollisuuden sivutuotteita, luonnonkiviaineksia, sementtiä, asfalttia ja bitumisoraa. Taulukosta 24 nähdään päällysrakenteisiin sijoitetut sivutuotemäärät.

Taulukossa 25 on esitetty sementin, asfaltin, bitumisoran ja niiden raaka-aineiden kulutus päällysrakennevaihtoehdoissa. Sementin pääraaka-aineet ovat kalkkikivi (75 %) ja savi (25 %), joita kuluu sementin valmistukseen kalkkikiveä 1 200 g/kg sementtiä ja savea 400 g/kg sementtiä (Häkkinen ja Mäkelä 1996). Lisäksi voidaan käyttää esim. kalkkia (Weiss 1985), mutta tässä tutkimuksessa oletettiin käytettävän vain kalkkikiveä ja savea.

Taulukko 24. Sivutuotemäärät toiminnallista yksikköä kohden päällysrakennevaihtoehdoissa.

	Tuhkarakenne LT1 t/km	Tuhkarakenne LT2 t/km	Betonimurske- rakenne BM1 t/km	Betonimurske- rakenne BM2 t/km	Masuuni- kuonarakenne MK t/km
Lentotuhka	12 000 ¹	6 400 ¹	-	-	-
Jätebetoni ²	-	-	8 860	14 100	-
Kuonamurske	-	-	-	-	2 160
Masuunihiekka	-	-	-	-	10 940
Yhteensä	12 000	6 400	8 860	14 100	13 100

¹ Sisältävät myös veden

² Jätebetoni sisältää noin 10 % terästä, eli yhden betonimursketonnin valmistukseen kuluu 1,1 tonnia jätebetonia (Lohja Rudus 1998). Rakenteeseen sijoitettavat betonimurskemäärät ovat rakenteessa BM1 n. 8 000 t ja rakenteessa BM2 n. 12 700 t.

Taulukko 25. Sementin, asfaltin ja bitumisoran (ja niiden raaka-aineiden) kulutus toiminnallista yksikköä kohden eri päällysrakennevaihtoehdoissa.

	LT1 t/km	LT2 t/km	LT3 t/km	BM1 t/km	BM2 t/km	MK t/km	V1 t/km
Sementti	250	130	-	-	-	-	-
- kalkkikivi ¹	290	160	-	-	-	-	-
- savi ¹	98	52	-	-	-	-	-
Asfaltti	1 250	3 600	3 600	3 600	2 000	3 600	3 600
- bitumi ²	88	230	230	230	130	230	230
- kalkkikivi ²	62	180	180	180	100	180	180
- murske ²	790	2 300	2 300	2 300	1 300	2 300	2 300
- hiekka ²	310	900	900	900	500	900	900
Bitumisoran	3 000	-	-	-	-	-	-
- bitumi ³	140	-	-	-	-	-	-
- hiekka ³	420	-	-	-	-	-	-
- murske ³	2 440	-	-	-	-	-	-
Yhteensä	4 500	3 700	3 600	3 600	2 000	3 600	3 600
Raaka-aineet yht.	4 650	3 800	3 600	3 600	2 000	3 600	3 600

¹ sementin raaka-aine

² asfaltin raaka-aine

³ bitumisoran raaka-aine

Asfaltin raaka-aineet ovat murske, hiekka, kalkkikivijauhe ja bitumi. Raaka-ainesuhteet vaihtelevat jonkin verran asfalttityypin mukaan. Tutkimuksessa käytettiin taulukossa 26 esitettyjä koostumuksia.

Taulukko 26. Asfaltin ja bitumisoran koostumus (RIL 170–1987).

	AB20	AB16	BST (bitumisora)
Murske	63,5	63	81,4
Hiekka	25	25	14
Kalkkikivijauhe	5	5	-
Bitumi	6,5	7	4,6

Veden kulutus on esitetty taulukossa 27. Lentotuhkaan lisättiin vettä jo voimalaitoksella. Massa kostutettiin mahdollisimman lähelle optimivesipitoisuutta, joka vaihtelee 14 ja 28 %:n välillä. Oletettiin, että lentotuhkamassojen vesipitoisuus on 20 %. Lentotuhkaan lisätyt vesimäärät ilmenevät taulukon 27 kohdasta seosvesi.

Taulukko 27. Veden kulutus toiminnallista yksikköä kohden eri päällysrakennevaihtoehtoissa. Lentotuhkaan lisättävä seosvesi on mukana taulukoissa 24 ja 28 esitetyissä tuhkamäärissä.

	Tuhka- rakenne LT1 t/km	Tuhka- rakenne LT2 t/km	Tuhka- rakenne LT3 t/km	Betoni- murske- rakenne BM1 t/km	Betoni- murske- rakenne BM2 t/km	Masuuni- kuona- rakenne MK t/km	Vertailu- rakenne V1 t/km
Seosvesi	2 400	1 280	1 280	-	-	-	-
Kasteluvesi	-	450	450	340	540	250	760
Vettä yht.	2 400	1 730	1 730	340	540	250	760

Vettä kului myös tietä rakennettaessa kerrosten kasteluun. Kalliomurskeesta ja masuunikuonamurskeesta tehty kantava kerros oletettiin kasteltavan tiivistysten välillä (yhteensä kaksi kertaa). Lisäksi betonimurskekerrokset kastellaan rakennusvaiheessa optimikosteuteen (10 %) ja niiden kastelua jatketaan kolme kertaa viikossa, kunnes kerros päällystetään. Päällystys oletettiin tapahtuvaksi kahden viikon kuluttua. Veden kulutus yhtä kastelukertaa kohden on 0,08 m³/ m³ itd (TS-kortti 5079). Lisäksi vettä kului eri vaiheissa kiviainesten pölyämisen estämiseen kastelun avulla. Näitä vesimääriä ei kuitenkaan pystytty arvioimaan ja ne jätettiin huomioimatta.

Taulukkoon 28 on koottu raaka-aineiden kulutus päällysrakennevaihtoehtoissa. Päällysrakenteisiin lasketaan tässä myös pengeri, joka on valmistettu suodatinhiekkää heikkolaatuisemmasta materiaalista (huonompilaatuinen hiekka). Tarkastelussa ovat mukana myös sementin, asfaltin ja bitumisoran raaka-aineet. Betonimurskeen valmistuksessa syntyy teräsjätettä noin 10 % betonin määrästä. Rakenteessa BM1

teräsjetettä syntyy 805 t ja rakenteessa BM2 1 285 t. Koska teräsjetäte menee hyötykäyttöön, sitä ei tässä laskettu jätteeksi (Lohja Rudus 1998).

Taulukko 28. Raaka-aineiden kulutus toiminnallista yksikköä kohden päällysrakennevaihtoehtoissa.

	Tuhka- rakenne LT1 t/km	Tuhka- rakenne LT2 t/km	Tuhka- rakenne LT3 t/km	Betoni- murske- rakenne BM1 t/km	Betoni- murske- rakenne BM2 t/km	Masuuni- kuona- rakenne MK t/km	Vertailu- rakenne V1 t/km
- murske	3 200	6 800	6 800	2 300	1 270	2 300	9 900
- hiekka	7 300	7 000	7 000	17 900	14 500	900	10 400
- hiekka (hl)	17 500	16 900	16 900	17 200	17 260	16 400	17 290
- sora	-	-	-	-	-	-	8 400
- kalkkikivi	360	340	180	180	100	180	180
- savi	98	52	-	-	-	-	-
- bitumi	230	230	230	230	130	230	230
Luonnon raaka-aineet yhteensä	28 700	31 300	31 000	37 800	33 200	20 000	46 300
Uusioraaka- aineet	12 000	6 400	6 400	8 900	14 100	13 100	-
Kasteluvesi	-	450	450	340	540	250	760

hl = huonompilaatuinen

7.1.2 Läjitysalue-sijoitus

Lentotuhkan ja betonimurskeen tierakennuskäytön vaihtoehtona oli läjitys. Kullakin lentotuhka- ja betonimurskerakenteella on oma läjitysvaihtoehto, jossa oletettiin sama sivutuotemäärä sijoitetuksi kaatopaikalle. Taulukossa 29 on esitetty raaka-aineiden kulutus läjitysvaihtoehtoissa. Lentotuhka sijoitetaan läjitysalueella louheesta rakennettuihin altaisiin. Louhealtaiden rakentamiseen kuluu louhetta 50 % lentotuhkan määrästä. Betonijäte viedään sellaisenaan läjitysalueelle.

Taulukko 29. Raaka-aineiden kulutus toiminnallista yksikköä kohden läjitysaluesijoituksessa.

	Tuhkan läjitys LT1L, t/yks.	Tuhkan läjitys LT2L, t/yks.	Betonijätteen läjitys, BM1L, t/yks.	Betonijätteen läjitys, BM2L, t/yks.
Lentotuhka	12 000 ¹	6 400 ¹	-	-
Louhe	6 000	3 200	-	-
Jätebetoni	-	-	8 860	14 100
Kuonamurske	-	-	-	-
Masuunihiekka	-	-	-	-
Yhteensä	18 000	9 600	8 860	14 100

¹ sisältävät myös veden

7.1.3 Pohjarakennevaihtoehdot

Taulukossa 30 esitetään raaka-aineiden kulutus pohjarakennevaihtoehdoissa ja taulukossa 31 poiskaivettavien massojen määrät. Pystyjoituksen painopenkereeseen tarvittava hiekka voidaan myöhemmin käyttää päällysrakenteessa.

Taulukko 30. Raaka-aineiden kulutus toiminnallista yksikköä kohden pohjarakennevaihtoehdoissa.

	Massa- stabilointi, t/km	Massanvaihto t/km	Syvä- ja massastabilointi , t/km	Pystyjoitus
Sementti	8 500	-	2 860	-
- kalkkikivi ¹	10 200	-	3 400	-
- savi ¹	3 400	-	1 140	-
Hiekkamoreeni	-	170 000	-	-
Hiekka (voidaan käyttää päällysrakenteessa)	-	-	-	78 750 t/km (painopenger)
Lamellipystyajat	-	-	-	85 000 m/km
Polypropeeni ²	-	-	-	5 780 kg/km

¹ sementin raaka-aine

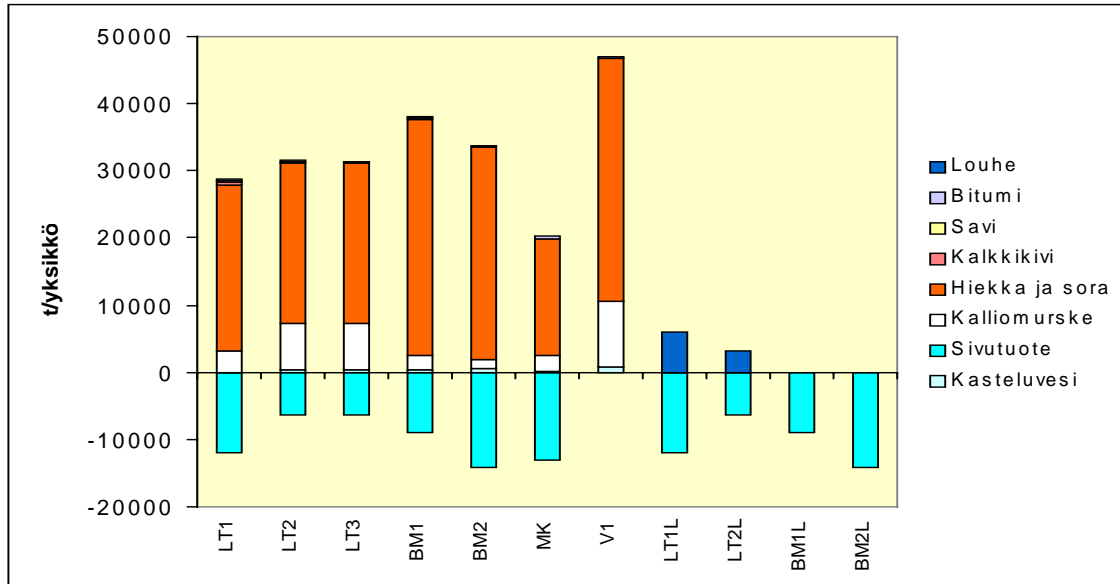
² pystyjojan raaka-aine

Taulukko 31. Poiskaivettavat massat pohjarakennevaihtoehdoissa.

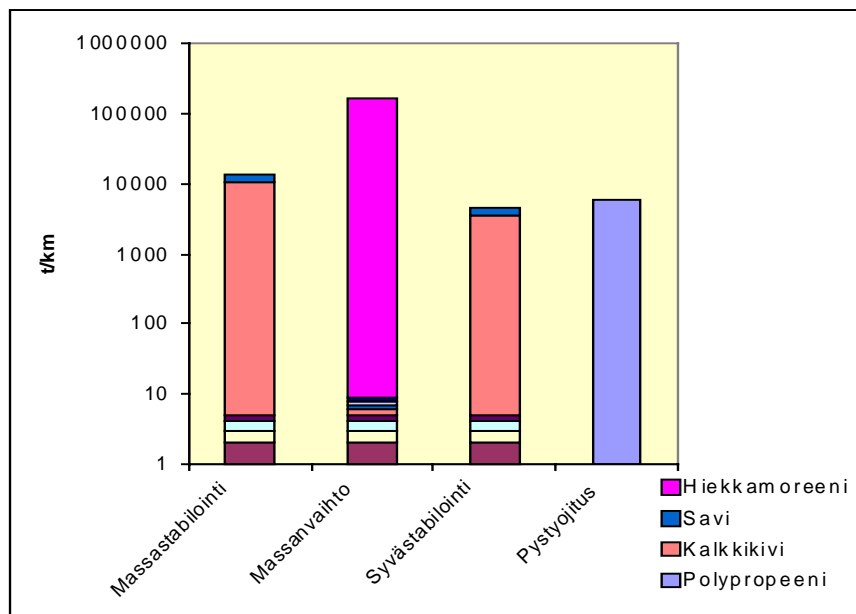
	Massastabiloi nti t/km	Massanvaihto t/km	Syvä- ja massastabiloi nti, t/km	Pystyjoitus t/km
Savi (läjitykseen)	-	127 500	-	-
Hiekka (voidaan käyttää hyväksi päällysrakenteessa)	-	-	-	78 750 t/km

7.1.4 Yhteenveto raaka-aineiden kulutuksesta

Kuvissa 8 ja 9 esitetään raaka-aineiden kulutus eri vaihtoehdoissa. Luonnonraaka-aineiden ja veden kulutus esitetään positiivisena ja uusioraaka-aineiden kulutus negatiivisena, koska sivutuotteiden hyötykäytössä säästyy kaatopaikkatilaa.



Kuva 8. Raaka-aineiden kulutus päällysrakenne- ja läjitysvaihtoehdoissa.



Kuva 9. Raaka-aineiden kulutus pohjarakennevaihtoehdoissa. Kuva-asteikko on muista kuvista poiketen logaritminen.

7.2 Energian ja polttoaineiden kulutus

Energian kulutus sisältää koneiden, ajoneuvojen ja raaka-aineiden valmistusprosessien käyttämän energian sekä orgaanisten materiaalien sisäisen energian. Raportissa esitetään erikseen energian kulutukseen sisältyvä polttoaineen kulutus, mihin on sisällytetty diesel- ja polttoöljyjen käyttö. Työkoneiden ja kuljetusvälineiden on oletettu toimivan dieselöljyllä. Rakennevaihtoehtojen koneiden käyttöajat, pakokaasupäästöt ja energian- ja polttoaineenkulutukset työvaiheittain ja -koneittain eriteltynä ovat taulukoituna liitteessä 3. Laskentamenetelmät on esitetty yksityiskohtaisesti erillisessä raportissa (Eskola 1998).

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:

$$E = P \cdot k/100 \cdot T, \text{ missä} \tag{1}$$

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

Pakokaasupäästömäärät saatiin kertomalla käytetty energia kunkin päästökomponentin päästökertoimella. Päästökertoimet, koneryhmien polttoaineiden ominaiskulutukset, nimellistehot ja käyttötehot on esitetty Purasen julkaisussa (1992) koneluokittain taulukoituna.

Työkoneiden polttoaineen kulutus laskettiin seuraavalla kaavalla (Puranen 1992):

$$Q = E \cdot q / \rho, \text{ missä} \tag{2}$$

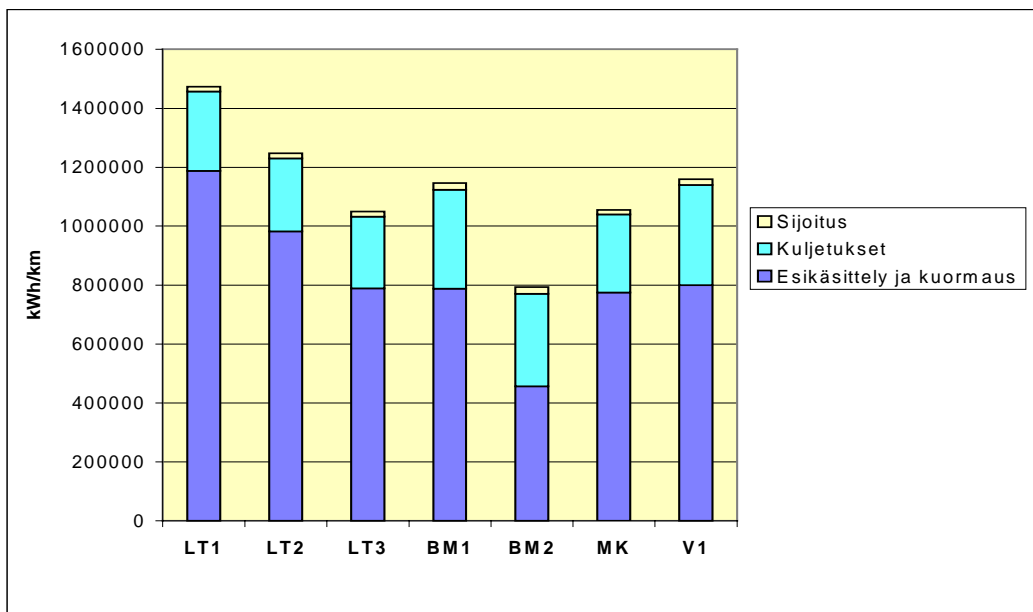
E on käytetty energia (kWh)
q on ominaiskulutus (g/ kWh)
 ρ on polttoaineen tiheys = 0,85 g/l (dieselöljy tai kevyt polttoöljy).

Sementtiä käytettiin stabilointiaineena syvä- ja massastabiloinnissa sekä lentotuhkan lisäaineena tierakenteessa. Sementin valmistuksen kuormitukset on otettu Häkkisen ja Mäkelän (1996) julkaisusta. Energian kulutus sementin valmistuksessa on 5,35 MJ/kg sementtiä, josta fossiilisen polttoaineen osuus on 4,9 MJ/kg ja sähkön 0,45 MJ/kg. Polttoaineen kulutus on muunnettu litroiksi olettaen, että kaikki käytetty polttoaine on ollut dieselöljyä ja että dieselöljyn energiasisältö on 36,3 MJ/l (Mäkelä 1998).

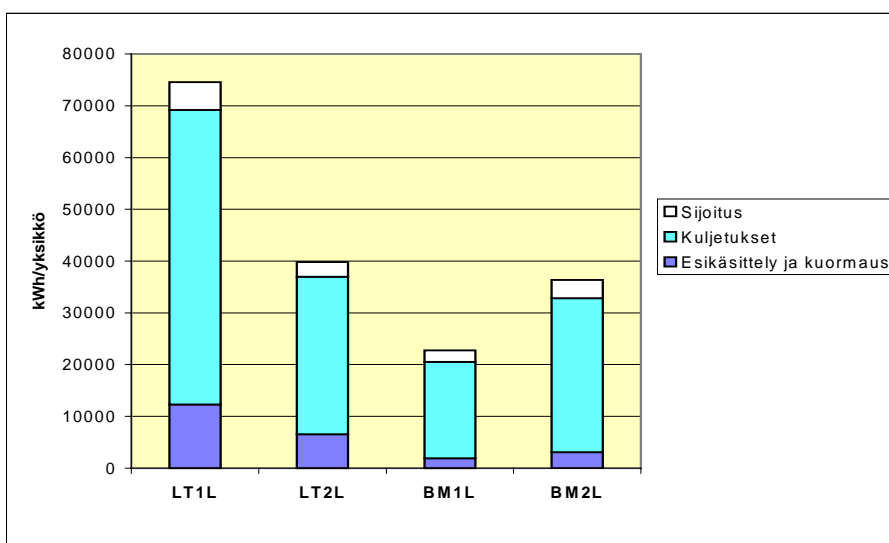
Asfaltin valmistuksen ja tien päällystyksen kuormitukset on laskettu kolmen eri raportin perusteella. Asfaltin raaka-aineiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt on laskettu Häkkisen ja Mäkelän (1996) raportin perusteella. Asfaltin valmistuksen ja asfaltoinnin

päästöt on saatu IVL:n raportista (Stripple 1995) ja asfaltin kuljetuksen päästöt Mäkelän et al. (1996) raportista.

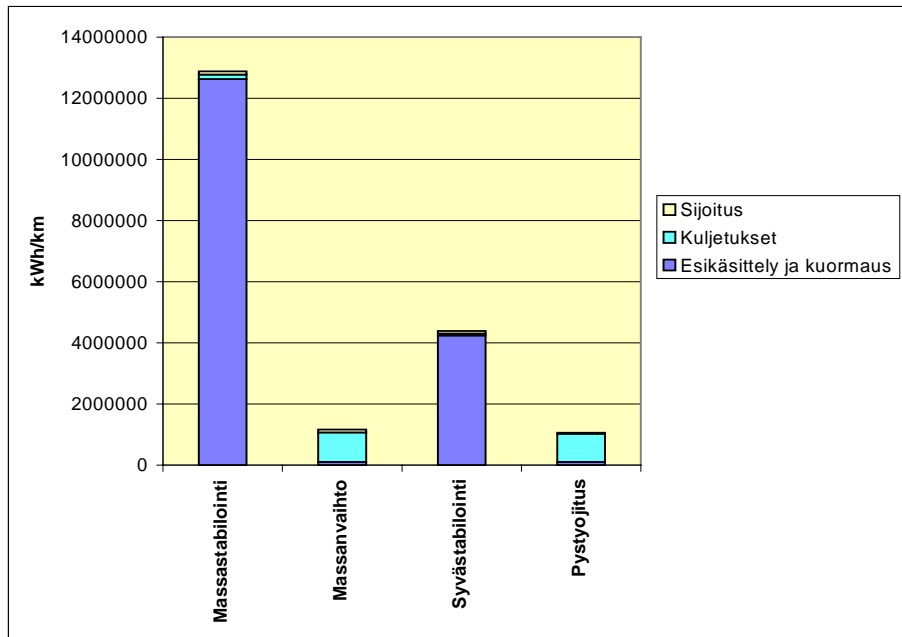
Louhintaräjätöksessä räjähdysaineena käytettiin ANOa eli ammoniumnitraattia. Sitä kului lentotuhkarakenteissa LT2 ja LT3 750 kg/km ja kulunut energiamäärä oli 825 kWh/km. Vertailurakenteessa ammoniumnitraattia kului 1 270 kg/km ja kulunut energiamäärä oli 1 390 kWh/km. Kuvissa 10, 11 ja 12 esitetään energian kulutus eri vaihtoehtoissa.



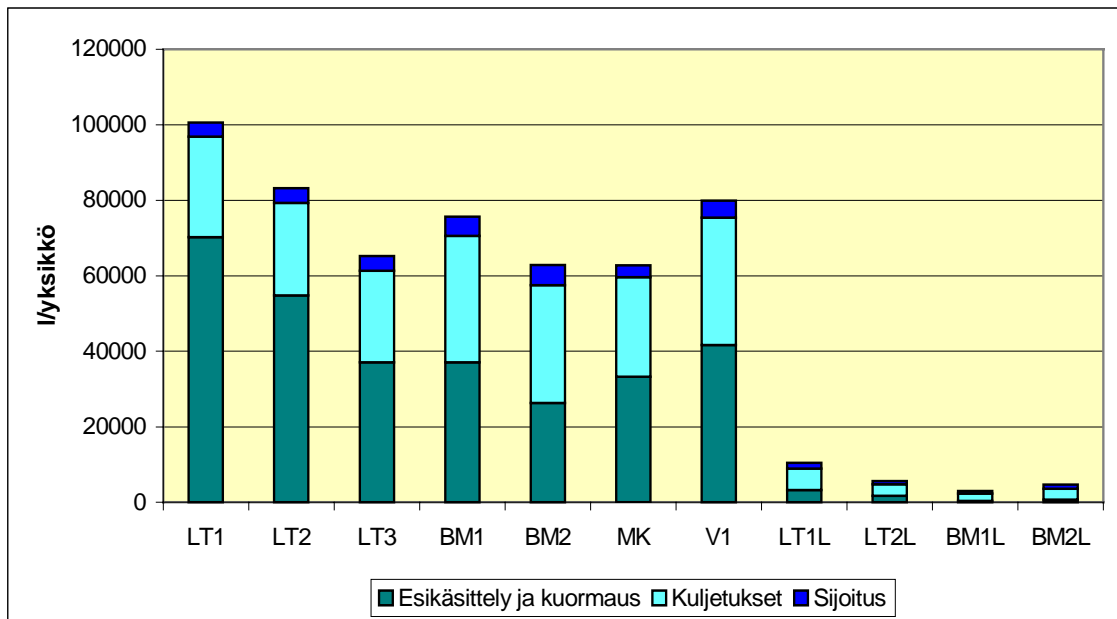
Kuva 10. Energian kulutus eri päällysrakennevaihtoehtoissa.



Kuva 11. Energian kulutus läjitysvaihtoehtoissa.



Kuva 12. Energian kulutus pohjarakennevaihtoehdoissa.



Kuva 13. Polttoaineen kulutus tien päällysrakenteissa ja läjitysvaihtoehdoissa.

Suurin energiankulutus on sementtiä sisältävillä tuhkarakenteilla (LT 1 ja 2). Betonimurskerakenteen 1 ja vertailurakenteen energiankulutus on likimäärin sama. Lentotuhkarakenteen 3 ja masuunikuonarakenteen energiankulutus on edellisiä hieman pienempi ja betonimurskerakenteen 2 energian kulutus on pienin. Energiankulutus on läjitysvaihtoehdoissa 20–30 kertaa pienempi kuin vastaavissa tierakenteissa.

Suurin osa energiasta kuluu esikäsitteily- ja kuormausvaiheissa, jotka sisältävät runsaasti energiaa kuluttavat sementin ja asfaltin valmistuksen. Esimerkiksi rakenteessa LT1 asfaltin osuus energian kulutuksesta on 57 %, sementin valmistuksen osuus on 25 % ja kaiken muun vain 18 %. Vertailurakenteessa asfaltin osuus on 67 % ja muun 33 %.

Kuvasta 11 nähdään, miten energian kulutus jakautuu työvaiheittain läjitysvaihtoehtoisissa. Kuljetukset aiheuttavat suurimmat ja sijoitus pienimmät kuormitukset. Jakauma on samansuuntainen myös tien rakennekerroksissa (ei asfaltti), jos ne eivät sisällä sementtiä. Pohjarakennevaihtoehtoista massa- ja syvästabiloinnin energiankulutus on huomattavasti suurempi kuin massanvaihdon ja pystyjoituksen. Tämä johtuu stabiloinneissa käytettävästä suuresta sementtimäärästä

Polttoaineen kulutus jakautuu suunnilleen samalla tavoin kuin energiankulutus, josta se muodostaa suuren osan. Päälysrakennevaihtoehtojen polttoaineenkulutus ei kuitenkaan eroa toisistaan kovin paljon (kuva 13). Läjitysvaihtoehtoisissa polttoaineenkulutus on noin kymmenesosa vastaavan tierakennevaihtoehdon polttoaineenkulutuksesta. Pohjarakennevaihtoehtoisissa pystyjoituksen ja massanvaihdon polttoaineenkulutus on vain hieman suurempi kuin päälysrakenteissa. Syvästabiloinnin polttoaineenkulutus on noin nelinkertainen ja massastabiloinnin noin 10-kertainen päälysrakenteisiin verrattuna.

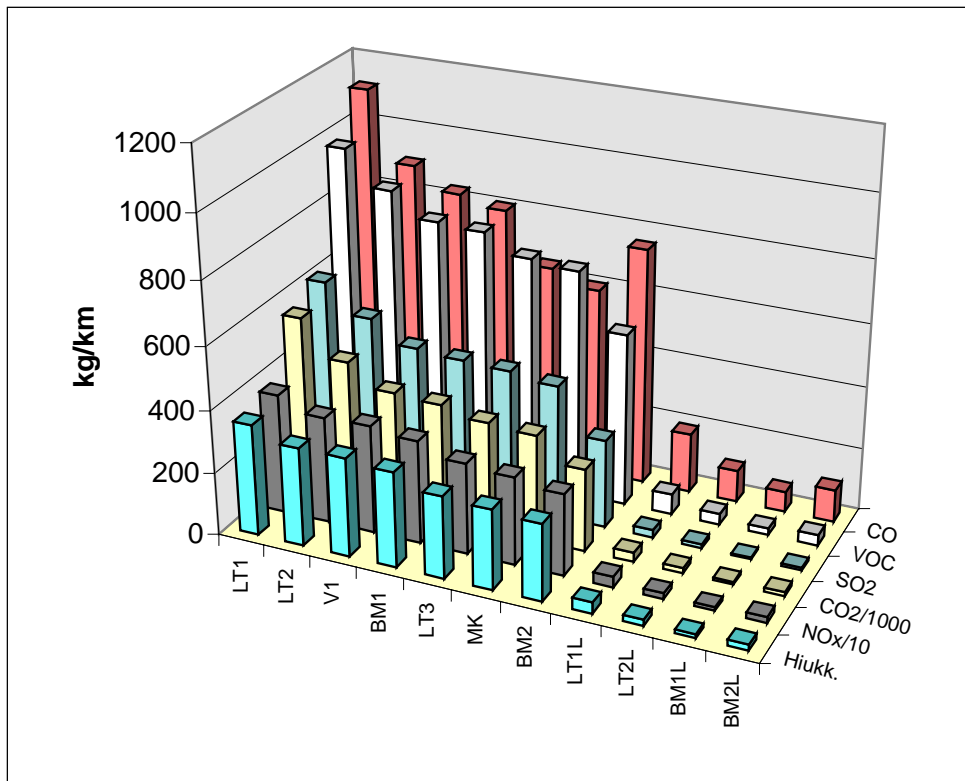
7.3 Päästöt ilmaan

7.3.1 Pakokaasupäästöt

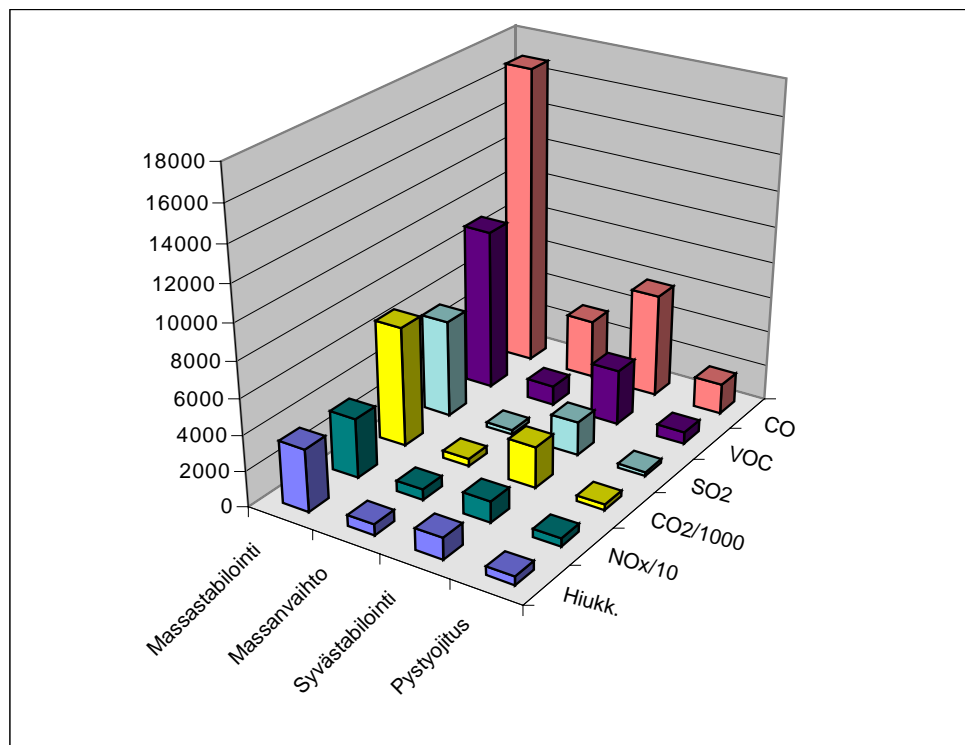
Tutkimuksessa ovat mukana seuraavat päästöt: typen oksidit (NO_x), hiilidioksidi (CO_2), hiilimonoksidi (CO), hiukkaset, rikkidioksidi (SO_2) ja haihtuvat orgaaniset aineet (VOC). Taulukossa 32 ja kuvissa 14 ja 15 esitetään vaihtoehtojen päästöt ilmaan kilogrammoina toiminnallista yksikköä kohden. Päästöt tien rakennekerroksittain esitetään liitteessä 4 ja päästöt työvaiheittain liitteessä 5.

Koska päästöt ilmaan ovat joitakin prosessipäästöjä lukuun ottamatta peräisin polttoaineiden käytöstä, ne jakautuvat rakennevaihtoehtojen, rakenneosien ja työvaiheiden kesken samalla tavoin kuin energian kulutus. Kaikkien päälysrakennevaihtoehtojen päästöt ovat suuruusluokaltaan samoja. Suurimmat päästöt ovat lentotuhkarakenteilla LT1 ja LT2, jotka sisältävät sementtiä. Seuraavaksi suurimmat päästöt ovat vertailurakenteella. Läjitysvaihtoehtojen päästöt ovat noin kymmenesosa vastaavasta tierakenteesta.

Massanvaihdon ja pystyjoituksen päästöt ilmaan ovat suuruusluokaltaan samoja kuin päälysrakenteiden vastaavat päästöt. Syvästabiloinnin päästöt ovat noin 5-kertaiset ja massastabiloinnin noin 15-kertaiset päälysrakenteisiin nähden.



Kuva 14. Päästöt ilmaan tien päällysrakenne- ja läjitysvaihtoehdoissa.



Kuva 15. Päästöt ilmaan pohjarakennevaihtoehdoissa.

Taulukko 32. Päästöt ilmaan (kg/ toiminnallinen yksikkö) rakennevaihtoehdoissa.

	CO	NO _x	Hiukk.	SO ₂	CO ₂	VOC
Tuhkarakenne 1	1 120	3 810	360	610	561 700	980
Tuhkarakenne 2	900	3 390	310	530	448 900	870
Tuhkarakenne 3	650	2 900	260	440	345 900	740
BM-rakenne 1	805	3 280	300	450	372 600	790
BM-rakenne 2	760	2 600	250	280	262 700	550
MK-rakenne	600	2 790	260	430	338 200	720
Vertailurakenne	830	3 440	320	460	380 500	800
Tuhkan läjitys 1	190	340	36	24	29 930	64
Tuhkan läjitys 2	100	180	19	13	15 970	34
BM läjitys 1	65	120	12	5	8 180	21
BM läjitys 2	100	190	19	8	13 060	34
Massastabilointi	16 900	33 500	3 500	5 500	6 746 600	9 080
Massanvaihto	3 320	5 910	620	260	416 900	1 100
Syvästabilointi	5 850	11 960	1 220	1 900	2 311 300	3 120
Pystyjoitus	1 720	4 540	480	220	333 000	670

7.3.2 Pölypäästöt

Pölyä syntyy kaikissa kiviainesten käsittely- ja jalostusvaiheissa. Kallionlouhinnan yhteydessä aiheuttavat pölyä ilmaan pääasiassa poraus, räjäytys ja louheen kuormaus. Porauksessa pölyä syntyy runsaasti ja lähes jatkuvasti. Räjäytyksessä paineaalto nostaa ilmaan porauksessa irronnutta ainesta. Kuormauksessa työkone irrottaa kulkiessaan pölyä maasta ja käsiteltävästä aineksesta. Lisäksi kuljetusajoneuvot irrottavat maasta pölyä. Kuljetusten pölyämiseen vaikuttavat mm. maan kuivuus ja ajonopeus. Myös kiviainesten purkamisen autoista kasoihin tai rakenteisiin aiheuttaa pölyämistä. Asfaltista irtoaa pölyä tien kulumisen seurauksena ja hiekoitushiekka pölyää. Lisäksi itse murskauslaitoksista aiheutuu suuria pölypäästöjä (Tielaitos 1995).

Lentotuhka on kuivana erittäin pölyävää. Sen kuormauksesta, kuljetuksista, varastoinnista ja purkamisesta kasoihin tai rakenteisiin voi siten aiheutua pölyhaittoja. Pölyämistä voidaan estää varastoimalla tuhka siilossa, kastelemalla massa ennen kuormaamista ja tiivistämällä rakenteet mahdollisimman nopeasti.

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

Käytännössä voi pienhiukkaspäästöillä olla kokonaispölypäästöä enemmän merkitystä. Pienikokoiset hiukkaset pysyvät ilmassa hyvin kauan ja kulkeutuvat ilmavirtojen kantamina. Näitä hiukkasia kutsutaan leijuviksi ja niiden pitoisuutta ilmassa leijumaksi (mg tai $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Pienhiukkaset ovat myös terveydelle haitallisia. Erityisen ongelmallinen on keuhkoihin pääsevä halkaisijaltaan alle 5 μm :n pöly (Matilainen 1986). Lentotuhka sisältää alle 2,5 μm :n hiukkasia noin 5 % ja alle 10 μm :n hiukkasia 10–20 % (Sloss 1996).

Isoja maan vetovoiman vaikutuksesta putoavia hiukkasia nimitetään laskeutuviksi. Laskeuma on tiettyä 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 leijumia ei voitu tarkastella, koska leijumamittauksia ei ole tehty kaikille työvaiheille. Myöskään lähin häiriintyvä kohde ei ollut tiedossa. Tielaitoksen tutkimuksessa kivenmurskaamojen pölypäästöistä todettiin, ettei pöly mukana olleissa murskaamoissa aiheuttanut ongelmia lähimmissä häiriintyvissä kohteissa (Tielaitos 1995).

Työvaiheiden pölypäästöjen arvioiminen osoittautui vaikeaksi, koska saatavilla oli vain hajanaisia pölypäästötietoja, joiden luotettavuus todettiin useimmissa lähteissä huonoksi. Lentotuhkan pölyämistä työn aikana on tutkittu hyvin vähän. Joitakin laskeumatietoja on olemassa, mutta niiden käyttö osoittautui hankalaksi. Lentotuhkan kuormausvaiheen (lentotuhka pudotetaan siilosta suoraan kuorma-auton lavalle) pölyämisestä löytyi yksi tutkimus (Muleski *et al.* 1986). Lisäksi lentotuhkan tierakentamisen aikaista pölyämistä on mitattu Knutersintiellä Sipoossa koerakennuskohteessa. Kahdessa 100 min kestäneessä mittauksessa ilman pölypitoisuudet olivat 0,36 ja 0,38 mg/m^3 . Nämä pitoisuudet eivät ylitä lyhyiden mittausten leijuvan pölyn ohjearvoa 0,4 mg/m^3 (Tomi 1997). Edellä mainittuja tietoja ei voida kuitenkaan käyttää esimerkkirakenteiden pölypäästöjen arvioinnissa.

Saadut pölypäästötiedot työvaiheittain ja ne työvaiheet, joiden pölypäästöistä ei löytynyt tietoja, ilmenevät taulukosta 33. Työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöjä ja muita pölypäästöjä on tarkasteltu erikseen, koska saatavien tietojen tarkkuustaso on erilainen. Tässä luvussa tarkasteltavat pölypäästöt eivät sisällä työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen ja energiantuotannon hiukkaspäästöjä.

Työvaiheista suurimmat pölypäästöjen aiheuttajat ovat kivenmurskaus, kuljetukset ja kuormaus. Taulukossa 34 esitetään tärkeimmät pölypäästöt päällysrakennevaihtoehdoissa (ei sisällä liikenteen ja energiantuotannon hiukkaspäästöjä). Muut tiedossa olevat

pölypäästöt olivat melko merkityksettömiä, eikä niitä ole esitetty tarkemmin tässä tutkimuksessa.

Taulukko 33. Pölypäästöt (Himanen et al. 1989, Muleski et al. 1986, EPA 1988).

Työvaihe	Pölypäästö	Hiukkaskoko
Louhinta/poraus	0,4 g/t kalliota 0,04 g/t kalliota	<30 µm <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 hihnakuuljettimella	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	'vain' leijumamittauksia	

Taulukko 34. Tärkeimmät pölypäästöt (kg/toiminnallinen yksikkö) päällysrakennevaihtoehtoissa.

	LT1	LT2, LT3	BM1	BM2	MK	V1
Murskaus	-	5 400	-	-	-	9 200
Kuormaus	720	940	990	900	500	1 500
Kuljetus	2 300	2 200	3 200	2 900	2 600	3 300

Pölypäästöt olivat selvästi suurempia mursketta sisältävissä vaihtoehtoissa (LT2, LT3 ja V1). Kuljetuksista ja kuormauksesta aiheutuvat päästöt olivat eri vaihtoehtoissa samaa suuruusluokkaa.

Edellä esitetyt tulokset on laskettu pelkästään saatavilla olleiden päästötietojen avulla, jolloin pölyä tuottavia vaiheita on jäänyt tarkastelusta pois. Esimerkiksi lentotuhkan pölyämistä ei ole juurikaan pystytty ottamaan huomioon.

7.4 Vaikutukset pohjaveteen

7.4.1 Sivutuotteista maaperään liukenevat aineet

Sivutuotteista maaperään kohdistuvia haittoja arvioitaessa tulee selvittää niistä veteen liukenevat aineet, jotka voivat kulkea valumaveden mukana sijoituspaikan ympäristöön ja sieltä pohjaveteen. Sivutuotteiden vaikutus suotoveteen ilmenee yleensä vasta pitkän ajan kuluttua niiden sijoittamisesta. Liukenevien aineiden määrä riippuu mm. materiaalin koostumuksesta, huuhtovan veden määrästä ja sijoitustavasta. Sijoitustavalla tarkoitetaan lähinnä tiivistystä ja peittämistä. Peittäminen vettä huonosti läpäisevällä materiaalilla, kuten asfaltilla, vähentää huuhtovan veden määrää. Lisäksi liukoisuus saattaa pienentyä lujittumisen vaikutuksesta valmiissa rakenteessa (Ranta *et al.* 1987).

Materiaaleista liukenevien aineiden määriä ei voida arvioida pelkästään koostumustietojen perusteella, koska metallien liukenevuus ja samalla haitallisuus ympäristölle riippuu siitä, minkälaisena yhdisteenä metalli esiintyy. Lentotuhkasta liukenee eniten sulfaatteja, kalsiumia, klorideja, natriumia ja kaliumia. Lentotuhka sisältää aina myös jonkin verran liukenevia raskasmetalleja (Ranta *et al.* 1987).

Betonimurskeesta liukenee jonkin verran sulfaattia ja kromia. VTT:n mukaan betonimursketta voidaan käyttää maarakentamisessa, jos sitä ei sijoiteta pohjavesialueelle ja murske peitetään huonosti vettä läpäisevällä materiaalilla, esim. asfaltilla (Wahlström & Laine-Ylijoki 1996a).

Masuunikuonarakenteesta saattaa liueta jonkin verran sulfaattiyhdisteitä lyhytaikaisen rakenteiden pintaosiin kohdistuvan huuhtoutumisen vaikutuksesta. Nämä pitoisuudet ovat niin pieniä, että masuunikuonaa voidaan käyttää maarakentamisessa muualla kuin pohjavesialueilla (Tielaitos 1993 ja 1997).

Rakenteesta liukeneva haitta-ainemäärä tiettyinä ajanjaksona voidaan arvioida laskemalla rakenteen läpi suotautuvan vesimäärä suhteessa materiaalimäärään (ns. L/S-suhde). Liukoisuus materiaalista vastaa testissä samassa L/S-suhteessa liuennutta määrää. L/S-suhde laskettiin kullekin sijoitusvaihtoehdolle seuraavasti:

$$L/S = t \cdot l \cdot (1\,000\text{ l/m}^3) / (d \cdot h), \text{ missä} \quad (3)$$

t on tarkasteltava aikaväli ensimmäisen suotoveden ilmaantumisen lähtien [v]

l on suotautumisnopeus [mm/v]

d on jätteen tiheys [kg/m^3]

h on jätekerroksen paksuus [mm].

Suotautumisnopeutena käytettiin asfaltilla peitetulle materiaalille 6 mm:ä/v ja peittämätömälle materiaalille 300 mm:ä/v. Em. arvoja käytetään Hollannissa eri materiaaleista liukenevien aineiden määrien arvioinnissa (Wahlström & Laine-Ylijoki 1996b). Lasketut L/S-suhteet on esitetty taulukossa 35.

Lentotuhkasta liukenevien haitta-ainemäärien arvioinnissa käytettiin tanskalaisen Hjelmarin *et al.* (1991) pölypolton lentotuhkasta tekemien kolonniliukoisuustestien tuloksia, joita verrattiin Suomessa vastaavissa testeissä todettuihin pitoisuuksiin. Testitulosten perusteella laskettiin sijoitusvaihtoehtojen L/S-suhteita vastaavat liukoisuudet (mg/kg jätettä) ja sijoitetuista sivutuotemääristä liukenevat ainemäärät toiminnallista yksikköä kohden (taulukko 36). Sementistä liukenevia aineita tai sementin haitta-aineiden liukoisuutta vähentävää vaikutusta ei pystytty ottamaan huomioon. Betonimurskeelle käytettiin VTT:ssä tehtyjen liukoisuustestien tuloksia (Wahlström & Laine-Ylijoki 1996a) ja masuunikuonalle hollantilaisten liukoisuustestien tuloksia (CROW 1994a, CROW 1994b).

Taulukko 35. Sijoitusvaihtoehtojen L/S-suhteet.

Sijoitusvaihtoehto	t, v	l, mm/v	d, kg/m ³	h, mm	L/S, l/kg
Tuhkarakenne LT1	50	6	1 400	650	0,33
Tuhkarakenne LT2 ja LT3	50	6	1 400	350	0,61
Betonimurskerakenne BM1	50	6	2 500	250	0,48
Betonimurskerakenne BM2	50	6	2 500	400	0,3
Masuunikuonarakenne MK	50	6	1 500	550	0,35
Lentotuhkan läjitys LTL	50	300	1 200	10 000	1,25
Betonijätteen läjitys BML	50	300	2 500	10 000	0,6

Liukoisuus kasvaa L/S-suhteen kasvaessa. Lentotuhkarakenteissa suurimmat liukoisuudet olivat sulfaatilla, kloridilla ja raskasmetalleista molybdeenillä, kromilla ja vanadiinilla. Lentotuhkan lujittuminen vähentää liukenemista. Lisäksi sementin käyttö sideaineena saattaa vähentää haitta-aineiden liukoisuutta. Toisin sanoen lasketut liukenevien aineiden määrät kuvaavat pahinta mahdollista tilannetta. Betonimurskeesta liukenee jonkin verran sulfaattia ja kloridia sekä pieniä määriä kromia, kuparia ja alumiinia. Masuunikuonasta liukeni hieman kadmiumia, lyijyä ja vanadiinia. Masuunikuonan liukoisuudet olivat erittäin pieniä.

Taulukossa 37 on verrattu rakennevaihtoehtoista liukenevia haitta-aineiden määriä VTT:n nykyisin käyttämien hollantilaisten ohjeellisten arvojen perustana olevaan korkeimpaan sallittuun päästöön materiaalista neliometriä kohti sadan vuoden aikana (Besluit 1995). Vertailuarvo on määritetty siten, että haitta-aineen pitoisuus rakenteen

alapuolella olevassa metrin paksuisessa referenssimaaperäkerroksessa saa nousta sadan vuoden aikana korkeintaan yhden prosentin. Jos jatkossa laaditaan suomalaiset ohjearvot, voidaan vertailumenettely muuttaa näiden ohjearvojen mukaiseksi. Taulukossa on esitetty ainoastaan sivutuotteista liukenevat ainemäärät. Taulukon 38 luonnonmateriaalien liukoisuustietojen perusteella mm. lyijyn, sinkin, nikkelin ja kadmiumin liukoisuudet luonnonmateriaalirakenteesta ovat suurempia tai yhtä suuria kuin sivutuoterakenteesta.

Taulukko 36. Sivutuotteita sisältävistä rakenteista liukenevien aineiden määrä toiminnallista yksikköä (kg/toiminnallinen yksikkö) ja tuotekiloa kohti (mg/kg, suluisissa) ensimmäisten 50 vuoden aikana.

Liukeneva aine	Tuhka- rakenne LT1	Tuhka- rak. LT2, LT3	BM- rakenne BM1	BM- rakenne BM2	Masuuni kuona- rak. MK	Tuhkan läjitys LT1L	Tuhkan läjitys LT2L	Betonilä- itys BM1L	Betonilä- itys BM2L
Sulfaatti, (mg/kg)	(720)	(900)	(800)	(700)		(980)		(900)	
kg/toim. yksikkö	9 000	5 800	7 100	9 900		12 000	6 300	8 000	12 700
Fluoridi, (mg/kg)	(0,2)	(0,4)				(0,61)			
kg/toim. yksikkö	2,0	2,6				7,3	3,9		
Kloridi, (mg/kg)	(90)	(90)	(20)	(19)		(96)		(21)	
kg/toim. yksikkö	1 100	580	180	270		1 200	620	180	290
Arseeni, (mg/kg)	(0,09)	(0,14)			(<0,001)	(0,18)			
kg/toim. yksikkö	1,1	0,9			<0,013	2,2	(1,2)		
Barium, (mg/kg)	(0,01)	(0,01)				(0,021)			
kg/toim. yksikkö	0,1	0,1				0,25	0,134		
Kadmium(mg/kg)	(0,00008)	(0,00010)			(0,0004)	(0,00012)			
kg/toim. yksikkö	0,0009	0,0009			0,0052	0,0014	0,00076		
Kromi, (mg/kg)	(0,265)	(0,271)	(0,14)	(0,12)	(<0,001)				
kg/toim. yksikkö	3,2	1,7	1,2	1,7	<0,013	3,4	1,8	1,3	2,1
Kupari, (mg/kg)	(0,0047)	(0,0055)	(0,075)	(0,06)	(0,004)	(0,0058)		(0,08)	
kg/toim. yksikkö	0,057	0,035	0,66	0,85	0,052	0,070	0,037	0,71	1,1
Elohopea(mg/kg)	(0,0004)	(0,0006)				(0,00062)			
kg/toim. yksikkö	0,004	0,004				0,0075	0,0075		
Molybd.(mg/kg)/	(2,4)	(2,7)			(<0,001)	(2,8)			
kg/toim. yks.	29	17			<0,013	34	18		
Nikkeli, (mg/kg)	(0,021)	(0,023)			(<0,001)	(0,023)			
kg/toim. yksikkö									
Lyijy, (mg/kg)	(0,0002)	(0,0004)			(0,004)	(0,00062)			
kg/toim. yksikkö	0,002	0,002			0,052	0,0074	0,0039		
Seleen, (mg/kg)	(0,048)	(0,056)				(0,059)			
g/toim. yksikkö	0,58	0,36				0,71	0,38		
Vanadiini(mg/kg)	(0,6)	(1,18)			(0,005)	(1,6)			
kg/toim. yksikkö	8,0	8,0			0,065	19,0	10,0		
Sinkki(mg/kg)	(0,003)	(0,005)			(<0,01)	(0,0090)			
kg/toim. yksikkö	0,04	0,03			<0,13	0,108	0,058		
Alumiini(mg/kg)			(0,011)	(0,008)				(0,013)	
kg/toim. yksikkö			0,097	0,11				0,12	0,12

Taulukko 37. Rakenteisiin sijoitetuista sivutuotteista liukenevat haitta-aineet verrattuina VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallittuun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m²) kohti sadan vuoden aikana.

Haitta-aine	Tuhka-rakenne LT1	Tuhka-rakenne LT2,LT3	BM-rakenne BM1	BM-rakenne BM2	MK-rakenne MK	Ohjearvo
sulfaatti, mg/m ²	692 000	446 000	546 000	761 000		2 225 000
kloridi, mg/m ²	84 600	44 600	13 800	20 800		1 500 000
arseeni, mg/m ²	84	69			<0,1	435
barium, mg/m ²	7,7	7,7				6 300
kadmium, mg/m ²	0,06	0,05			0,4	12
kromi, mg/m ²	250	140	92	131	<0,1	1 500
kupari, mg/m ²	4,4	2,7	51	65	<1	540
elohopea, mg/m ²	0,3	0,2				4,5
molybdeeni*, mg/m ²	1 260	1 260			<0,1	1 140*
nikkeli, mg/m ²	19	12			<0,1	525
lyijy, mg/m ²	0,15	0,15			4	1 275
seleeni, mg/m ²	45	28				15
vanadiini, mg/m ²	615	615			5	2 400
sinkki, mg/m ²	3	2			<10	2 100

* Molybdeenin ohjearvona on käytetty VTT:n lentotuhkien sijoituskelpoisuuden arvioinnissa käyttämää ohjearvoa, jossa liukenemisen on oletettu tapahtuvan diffuusioliukenemisena. Tämä ohjearvo on suurempi kuin maaperässä sallittu pitoisuuden nousu.

Taulukosta 38 nähdään luonnon materiaaleista liukenevien aineiden määriä verrattuna lentotuhkaan, betonimurskeeseen ja masuunikuonaan. Sivutuotteiden liukoisuustietoihin verrannollisia luonnonmateriaalien liukoisuustietoja löytyi hyvin vähän, ja siksi taulukossa esitettyjen tietojen edustavuutta on vaikea arvioida.

Taulukko 38. Luonnonkiviaineksista ja sivutuotteista liukenevien aineiden määriä L/S-suhteessa 2 (Kälvesten 1996, Hjelmar et al. 1991, Wahlström & Laine-Ylijoki 1996a, CROW 1994b).

	Murske mg/kg	Sora mg/kg	Moreeni mg/kg	Lentotuhka mg/kg	Betonimurske mg/kg	Masuuni-kuona mg/kg
Cd	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	<0,002	0,002
Cr	0,002	0,002	0,002	1,28	0,2	0,0025
Cu	0,009	0,003	0,003	0,006	0,14	0,009
Ni	0,04	0,06	0,04	0,02		0,004
Pb	0,002	0,002	0,002	0,001		
Zn	0,015	0,017	0,013	0,011	<0,06	

7.5 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 ($=\mu 20$ Pa). Äänitason yksikkö on desibeli (dBA). Lääkintöhallitus on antanut melun terveydelliset ohjearvot, jotka ilmenevät taulukosta 39 (Matilainen 1986, Tielaitos 43/1993).

Taulukko 39. 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:ä alhaisempiin tasoihin.

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:ä korkeammat melutasot. Yöajan (klo 7–22) ohjearvoa sovelletaan vain telttailu- ja leirintäalueilla.

Melu etenee lähteestä kaikkiin suuntiin. Se 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 toimintaa suunniteltaessa 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 vaihtoehtojen kokonaismelua, koska työvaiheet tapahtuvat eri paikoissa ja työkoneita käytetään eri aikaan ja eripituisia jaksoja. Lisäksi ulkoiset olosuhteet vaikuttavat melupäästöihin kuten edellä on mainittu. Työkoneiden ja -vaiheiden melut ilmoitetaan taulukossa 40 melutasona seitsemän metrin etäisyydellä lähteestä (Matilainen 1986, Naturvårdsverket 1983).

Suurin melutaso on louhintaräjähdyksellä. Se on impulssimainen ääni, joka saattaa aiheuttaa esim. rakenteellisia vaurioita tai ikkunaruuhtujen särkymistä. Seuraavaksi

suurimmat melutasot olivat kallioporakoneella ja murskaamolla. Niiden melutaso oli 100 dB. Työkoneiden ja kuorma-autojen melutasot vaihtelivat 84 ja 92 desibelin välillä.

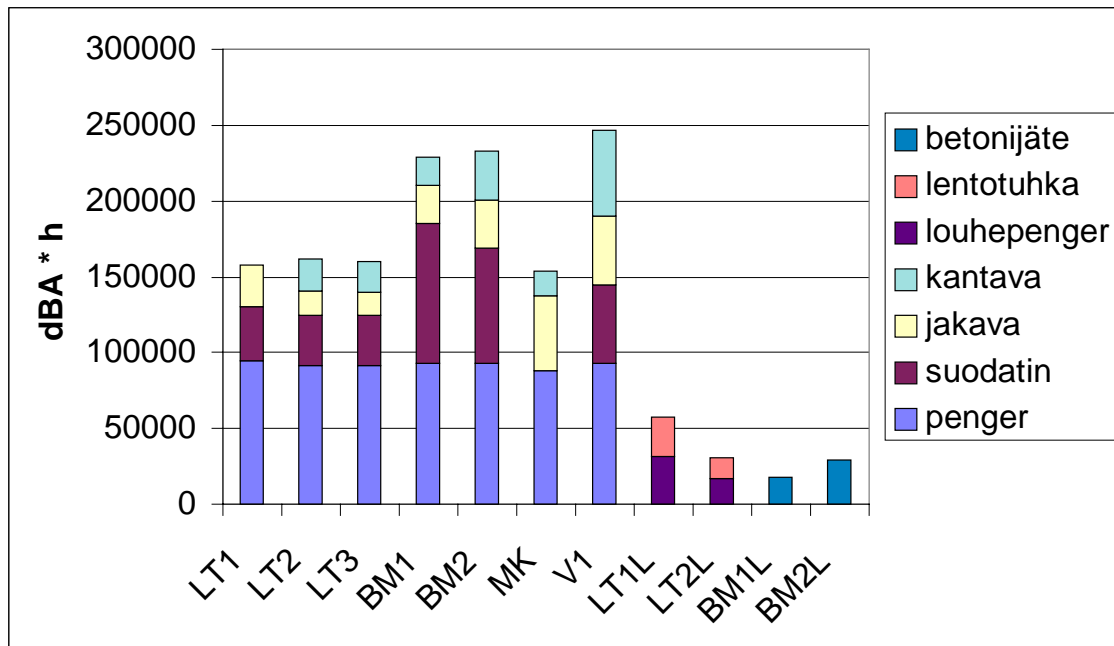
Taulukko 40. Työkoneiden ja -vaiheiden melutasot 7 metrin etäisyydellä lähteestä.

Kone	Melutaso DBA	Keskimääräinen melutaso (dBA)
Vaunuporakone	98–101	100
Louhintaräjätys	125–136	130
Hydraulivasara	87–92	90
Hihnakuuljetin	84	84
Murskaamo	100	100
Hydraulinen kaivinkone	82–100	89
Maansiirtoauto	91	91
Kuorma-auto	84	84
Puskutraktori	80–89	84
Tiejyry	84–101	92
Asfaltinlevitin	74–89	81
Tiehöylä	85–89	87

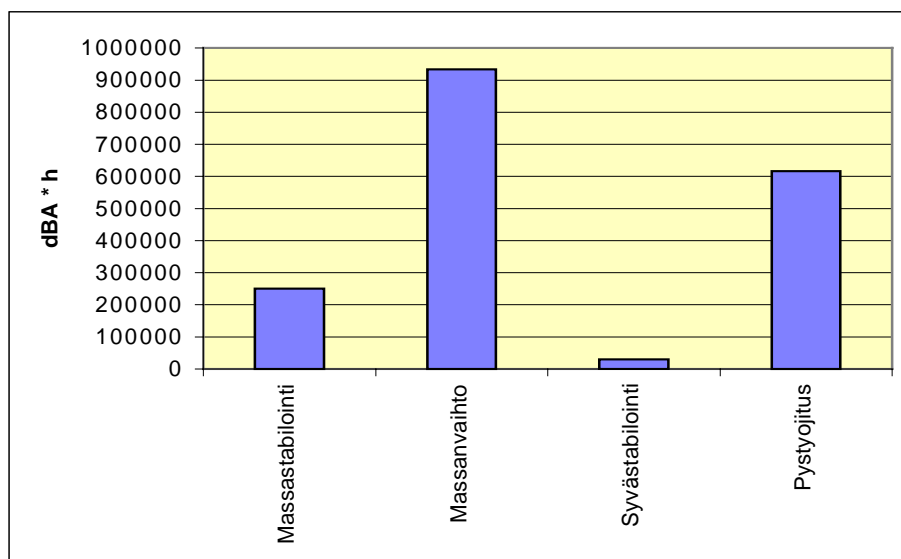
Voimalaitoksella tuhkan käsittelyyn käytettyjen koneiden melutasot ovat melko korkeita, yleensä 90–95 dB. Melutaso vaihtelee kuitenkin melko paljon laitoksen sisällä (Ollila 1994). Kyseinen melu oletettiin tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömäksi, sillä laitteet ovat voimalaitoksen sisällä, tiloissa, missä ei jatkuvasti oleskele ihmisiä. Louhintaräjätysten melutaso jouduttiin jättämään tarkastelusta pois, koska räjäytyksestä aiheutuva ääni on hyvin lyhytkestoinen. Asfalttikerroksen tekemisestä aiheutuvaa meluaikaa ei pystytty laskemaan, koska käytetyt työajat eivät olleet tiedossa. Samasta syystä joitakin muita työvaiheita (sementin valmistus, stabiloinnit sekä pystyjojanauhojen valmistus ja kuljetus laivalla) jouduttiin jättämään tarkastelun ulkopuolelle.

Vaihtoehtoja vertailtiin seuraavasti: Kunkin työvaiheen melutaso kerrottiin työajalla, jolloin saatiin nk. meluaika (dBA • h) kullekin työvaiheelle. Meluajat laskettiin yhteen rakennekerroksittain ja näitä tuloksia vertailtiin keskenään. Oletettiin, että työvaiheet tapahtuvat peräkkäin. Tulokset esitetään kuvissa 16 ja 17.

Suurimmat meluajat oli vertailu- ja betonimurskerakenteilla. Lentotuhka- ja masuunikuonarakenteiden meluajat olivat edellisiä noin 40 % pienemmät. Penger- ja suodatinkerroksen tekeminen tuottivat eniten melua. Pohjarakennevaihtoehdoista massanvaihto ja pystyjoitus aiheuttivat huomattavasti melua. Tämä johtui pääasiassa siitä, että niissä kuljetettiin suuria massamääriä. Läjitys aiheutti vähiten melua.



Kuva 16. Meluajat rakennekerroksittain tien päällysrakenne- ja läjitysvaihtoehdoissa.



Kuva 17. Meluajat rakennekerroksittain tien pohjarakennevaihtoehdoissa.

7.6 Tien kunnossapidosta aiheutuvat kuormitukset

Tien kunnossapidosta 50 vuoden aikana aiheutuvat ympäristökuormitukset arvioitiin Häkkisen ja Mäkelän (1996) raportin perusteella. Kunnossapito oletettiin tehdyksi suomalaisen kunnossapitostrategian mukaisesti (Häkkinen & Mäkelä 1996, liite 4), mikä vastaa melko pitkälle raportin alussa ehdotettua kunnossapitostrategiaa. Kuormitukset on laskettu Häkkisen ja Mäkelän (1996) raportin kuormituksista suhteuttamalla ne tässä

raportissa tarkasteltuun tien leveyteen. Tarkempaan laskentaan tarvittavia lähtötietoja ei ollut saatavilla. Taulukossa 41 on esitetty tien kunnossapidosta aiheutuvat kuormitukset 50 vuoden aikana.

Taulukko 41. Tien kunnossapidosta aiheutuvat kuormitukset 50 vuoden aikana verrattuna tienrakennuksesta aiheutuviin kuormituksiin.

Kuormitukset	Kunnossapito	Tierakennus	Kunnossapidon osuus tierakennuksen kuormituksista
CO₂ (kg/km)	33 900	263 000–562 000	6–3 %
SO₂ (kg/km)	4,1	280–610	0,7–1,5 %
NO_x (kg/km)	140	2 600–3 800	3,7–5,4 %
CO (kg/km)	20	600–1 100	1,8–3,3 %
VOC (kg/km)	210	550–980	21–38 %
Polttoaineen kulutus (l/km)	18 200	63 000–100 000	18–29 %
Energian kulutus (kWh/km)	183 300	790 000–1 470 000	12–23 %

7.7 Maan käyttö

Maan käytöstä voi aiheutua hyvin erilaisia seurauksia maisemalle, maaperälle, vesille, kasvillisuudelle ja eliöille. Tien rakentaminen vaikuttaa mm. maisemaan sekä ihmisten ja eläinten elinympäristöön. 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. 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).

Maan käytön seurauksia ei aina tunneta hyvin ja lisäksi vaikutukset ovat usein paikallisten tekijöiden mukaan määräytyviä. 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 kestoja ei oteta huomioon.
- Maankäyttö lasketaan inventaarissa pinta-alan ja käyttöajan mukaan (m²a). Jos maankäyttö on hyvin pitkäaikaista, se määritellään loppukäytöksi ja esitetään pelkästään pinta-alana (Heijungs et al. 1992).

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

Tierakentamisen maan käytössä merkittävin tekijä on itse tierakenteen alle jäävä pinta-ala, joka on kaikilla rakennevaihtoehdoilla sama. Tässä tapauksessa tien alle jäävä pinta-ala on 20 000 m²/km. Tien suojavyöhykkeet vaativat lisäksi noin puolitoista kertaa tien pinta-alan verran tilaa. Lisäksi tulisi ottaa huomioon soran ja hiekan otosta ja louhinnasta aiheutuva maankäyttö. Täysin kuvitteellisessa tapauksessa sen merkitystä on vaikea arvioida, koska käytännössä louhittava kiviaines tulee osittain tien-rakennustyömaalta, osittain muualta. Myös soranottoaikat ja soran saanti-mahdollisuudet ovat hyvin erilaisia.

Luonnon materiaalien hankinnan maan käyttö on kuitenkin maarakentamisessa vaikutuksiltaan niin merkittävä, että se on syytä jatkossa ottaa yhdeksi arviointikriteeriksi. Arviointi ehdotetaan kuitenkin suoritettavaksi vertaamalla maan käytön merkittävyyttä kussakin vaihtoehdossa viisiportaisella pisteyttävällä asteikolla. Pisteytyksessä otetaan huomioon luonnonmateriaalien ottoon tarvittava pinta-ala, materiaalien saatavuus alueella ja mahdollisuuksien mukaan myös materiaalin ottoalueen herkkyys. Pisteytys-kriteerit määritellään tarkemmin tutkimuksen seuraavassa vaiheessa.

Jos sivutuotteet siirretään hyötykäytön sijasta läjitysalueella, tarvitaan kaatopaikkatilaa. Myös kaatopaikkatilan tarvetta ehdotetaan jatkossa arvioitavan viisiportaisella pisteasteikolla, jossa pääkriteerinä on sijoituksen tilantarve. Tämän tutkimuksen vaihtoehdoissa materiaalikohtainen kaatopaikkatilan tarve arvioitiin seuraavaksi: LT1L 1 200 m²/yksikkö, LT2L 640 m²/yksikkö, BM1L 350 m²/yksikkö ja BM2L 570 m²/yksikkö. Läjityksessä on oletettu, että massat läjitetään 10 m paksuksi kerrokseksi.

7.8 Onnettomuusriskit

Maa- ja vesirakennustoiminta on perinteisesti ollut ala, jossa tapaturmia sattuu paljon. Esimerkiksi tapaturmaisen kuoleman vaara on 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 (Reinikka 1987, Hyödynmaa & Herranen 1987). Lisäksi maamassojen ja sivutuotteiden kuljetuksiin liittyy aina onnettomuusriski. Onnettomuusriskien arviointi jätettiin kuitenkin tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska tietoja ei ollut saatavilla riittävästi eri työvaiheiden onnettomuusriskien arvioimiseksi.

8. Ympäristövaikutusten arviointi

8.1 Ympäristökuormitustietojen saatavuus ja luotettavuus

Ympäristökuormitustietojen saatavuus ja luotettavuus oli eri kuormituksilla hyvin erilainen. Työkoneiden käytön aiheuttamien kuormitusten laskennassa käytetyt päästökertoimet, koneryhmien polttoaineiden kulutustiedot (Puranen 1992) ja keskimääräisten työvuorokapasiteettien (TS-tietokortit, Jylhä 1992) perusteella lasketut käyttöajat ovat kullekin koneryhmälle annettuja keskimääräisiä tietoja, jotka ovat riittävän tarkkoja yleisellä tasolla. Yksittäistapauksia tarkasteltaessa nämä kuormitustiedot saattavat kuitenkin olla liian epätarkkoja.

Kuljetusten päästöt ja polttoaineen kulutus saatiin kertomalla kuljetusmatka päästöker-toimella, jotka on esitetty Mäkelän *et al.* (1996) julkaisussa. Energian kulutus saatiin muuntokertoimella polttoaineen kulutuksesta (Mäkelä 1998). Kuljetusten ympäristökuormitustiedot ovat keskimääräisiä tietoja, joiden luotettavuus on 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. Lentotuhkan pölyämisestä löytyi tietoa vielä vähemmän kuin kiviainesten pölyämisestä. Pölypäästöjen osalta tietopohja on puutteellinen, ja siksi myös tämän raportin pölypäästöarvioissa on puutteita ja epävarmuuksia.

Sivutuotteista liukenevien aineiden määriä arvioitiin osittain kotimaisten ja osittain ulkomaisten kolonniliukoisuustestien tulosten perusteella. Kolonnitesteissä simuloidaan monien vuosien suotautumistapahtumia muutamissa kuukausissa. Esimerkiksi lentotuhkien liukoisuuksissa on laitoskohtaisia eroja, jotka saadaan esiin vain käytettävästä materiaalista tehtävällä testillä. Lisäksi simuloidut tulokset ovat aina arvioita todellisesta ympäristössä tapahtuvasta liukenemisestä, joka saattaa vaihdella sijoitusolosuhteiden, sijoituksen aikaisten työtapojen ja olosuhteiden, pinnoitteen kunnon ym. mukaan. Massa ei myöskään aina ehdi lujittua lyhyenä koeaikana. Lujittuminen pienentää todellisissa olosuhteissa liukoisuuksia. Myös sementin käyttö lentotuhkan lisäaineena lujittaa rakennetta ja pienentää liukoisuuksia. Siksi koetulosten perusteella arvioidut liukenevien aineiden pitoisuudet ovat todennäköisesti todellista suurempia. Tavoitteena on verrata sivutuotteista liukenevien aineiden määriä myös luonnon kiviaineksista liukeneviin määriin (Kälvesten 1996). Luonnon kiviaineksista on hyvin vähän liukoisuustietoja, ja siksi saatavissa olevien tietojen edustavuutta on vaikea arvioida. Tarkasteluun tulisi ottaa mukaan myös asfaltista ja sementistä liukenevat aineet, joista ei löytynyt riittävästi tietoa.

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

Työkoneiden ja -laitteiden melupäästöt ilmoitettiin keskimääräisenä melutasona seitsemän metrin etäisyydellä lähteestä. Kunkin konetyypin melutaso vaihtelee jonkin verran, mutta keskimäärin melukuormitusten arvot ovat luotettavia. Eri vaihtoehtoja vertailtiin laskemalla nk. meluaika (desibeleinä esitetty melu kerrottiin sen kestoajalla) kullekin työvaiheelle ja vertaamalla näiden perusteella laskettuja kokonaismeluaikoja keskenään. Tämän tarkastelutavan luotettavuutta on vaikea arvioida, mutta se on varmasti ainakin suuntaa-antava.

Maan käyttöä arvioitiin eri vaihtoehtojen tarvitseman pinta-alan mukaan. Huomioon otettiin vain tien alle jäävä tai läjitykseen tarvittava pinta-ala. Luonnon raaka-aineiden oton maankäyttö jäi arvioinnin hankaluuden vuoksi selvittämättä, mutta myös se olisi pyrittävä arvioimaan.

Yksinkertaistetut arviointitulokset kuvaavat huonosti maan käytön todellista merkitystä. Maan käytön 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.

Maa- ja tierakennustoiminnassa onnettomuusriski on useimmissa työvaiheissa melko suuri verrattuna muihin aloihin. Tässä tutkimuksessa onnettomuusriskit jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska kaikista työvaiheista ei löytynyt tarpeeksi tietoa.

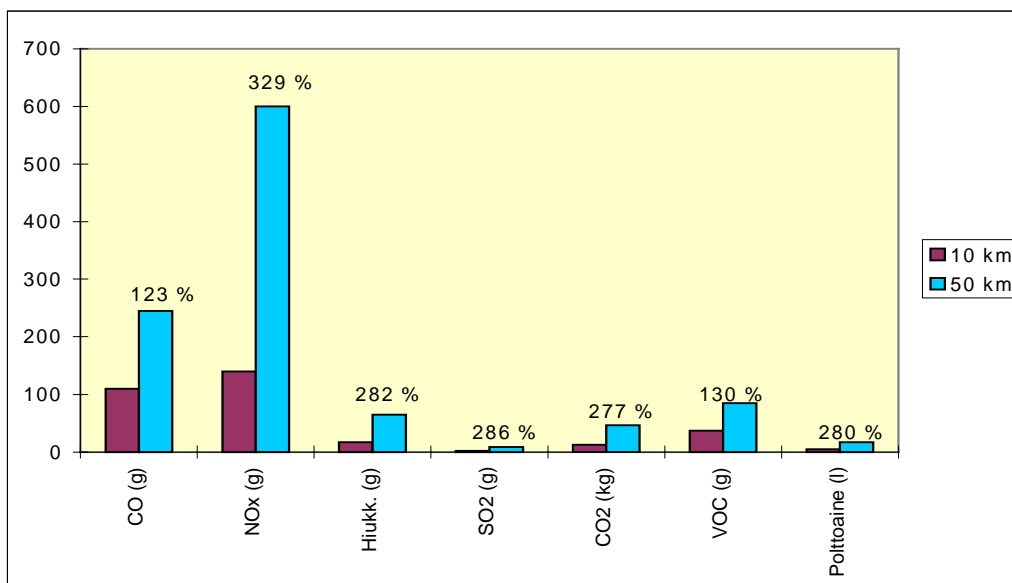
Tienpintojen kulumisen ja sivutuotteiden käytön vaikutukset tien käyttöominaisuuksiin ja korjaustarpeeseen jouduttiin jättämään huomiotta tässä tutkimuksessa, koska näistä vaikutuksista ei löytynyt riittävästi tietoja. Tien kunnossapidosta aiheutuvat kuormitukset arvioitiin Häkkisen ja Mäkelän (1996) raportin perusteella. Raportissa tarkasteltu kunnossapitostrategia ei vastaa tarkalleen tässä tutkimuksessa esitettyä kunnossapitostrategiaa, joten tulokset eivät ole kovin tarkkoja, mutta varmasti suuntaa-antavia.

Arvioinnista on jätetty pois myös rakenteen käytöstä poiston jälkeiset kuormitukset. Esimerkiksi haitta-aineiden liukeneminen jatkuu tarkasteluajan jälkeen, jos tie jätetään paikalleen. Lisäkuormituksia aiheutuu myös, jos tie puretaan ja materiaalit käytetään uudelleen tai viedään kaatopaikalle.

8.2 Tulosten epävarmuudet

Koska ympäristökuormituksia arvioitaessa jouduttiin tekemään monia oletuksia, tulosten epävarmuudet ja vaihteluvälit ovat melko suuria. Tulosten luotettavuutta parantaa kuitenkin se, että eri vertailuvaihtoehtojen tarkastelussa on tehty samoja oletuksia. On käytetty mm. samankokoisia koneita ja samoja kuljetusmatkoja. Siksi käytetyillä oletuksilla on vaihtoehtojen vertailussa suurempi vaikutus tulosten absoluuttisiin arvoihin kuin vertailun lopputulokseen.

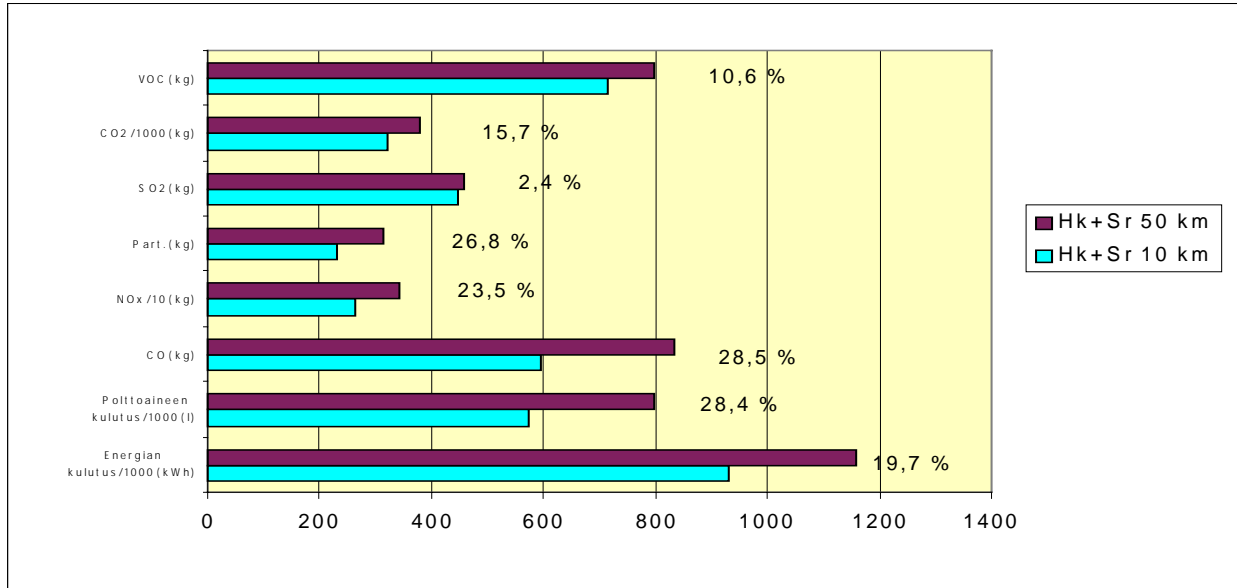
Koska kuljetusmatkojen vaikutus vaihtoehtojen energian- ja polttoaineen kulutukseen ja päästöihin on huomattava, tehtiin herkkyystarkastelu kuljetusmatkan vaikutuksesta kuormitukseen. Kuvassa 18 on esitetty ilmapäästöt ja polttoaineen kulutus 10 ja 50 kilometrin kuljetusmatkoilla. 10 kilometrin kuljetusmatkalla oletettiin, että kuljetus tapahtui katuja pitkin, ja 50 kilometrin kuljetusmatkalla oletettiin, että kuljetus tapahtui yleisiä teitä pitkin. Päästökertoimet ovat suuremmat kaduilla kuin yleisillä teillä, koska kaduilla ajonopeudet ovat pienempiä ja pysähdyksiä tapahtuu enemmän.



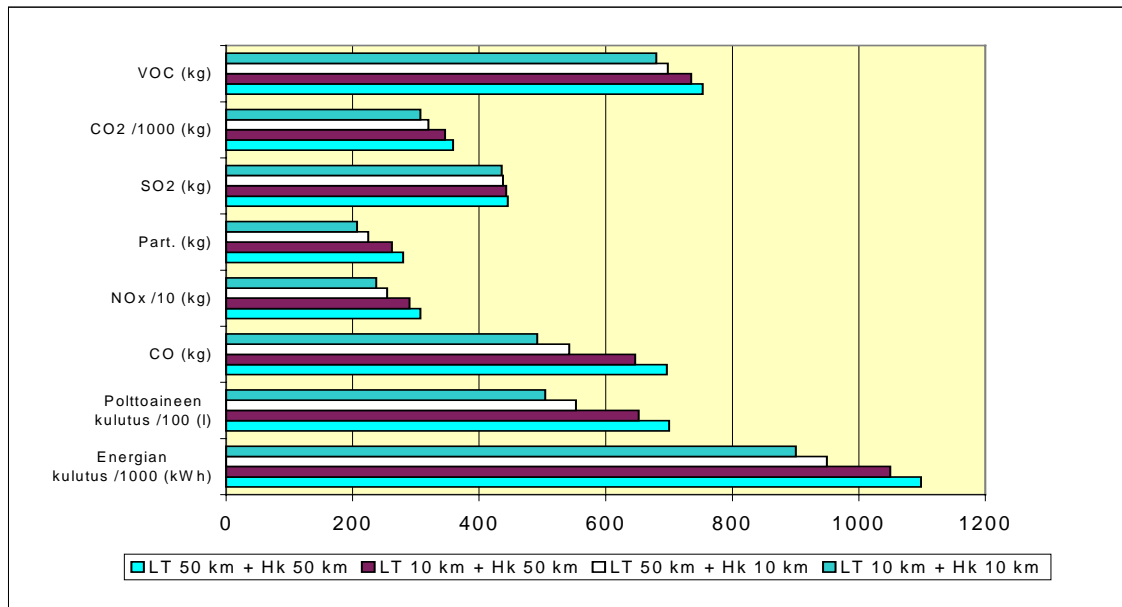
Kuva 18. Kuljetusmatkan vaikutus ilmapäästöihin ja polttoaineen kulutukseen.

Kuvassa 18 pylväiden päällä olevat prosenttiluvut kertovat, kuinka paljon suurempi kuormitus aiheutuu 50 kilometrin kuljetusmatkasta verrattuna 10 kilometrin kuljetusmatkaan. NO_x-, CO₂-, SO₂- ja hiukkaspäästöt sekä polttoaineen kulutus ovat noin 300 % suurempia ja VOC- ja CO-päästöt ovat noin 100 % suurempia 50 kilometrin kuljetusmatkalla. Tässä ei ole otettu huomioon kuljetettavia kokonaismassamääriä. Massamäärillä on kuitenkin suuri vaikutus kuljetuksista aiheutuviin kokonaiskuormituksiin.

Kuvassa 19 tarkastellaan sitä, kuinka paljon kokonaiskuormitukset kasvavat vertailurakenteessa, jos hiekan ja soran kuljetusmatka kasvaa 10 kilometristä 50 kilometriin. Hiukkas-, NO_x- ja CO-päästöt sekä polttoaineen kulutus kasvavat noin 25 %. Energian kulutus kasvaa 20 % ja CO₂-päästöt lisääntyvät 16 %. VOC-päästöt kasvavat 10 %, mutta SO₂-päästöihin kuljetusmatkalla ei ole juurikaan vaikutusta.



Kuva 19. Hiekan ja soran kuljetusmatkan vaikutus ympäristökuormitukseen vertailuvaihtoehdossa VI (luonnon kiviaineksista rakennettu tierakenne).



Kuva 20. Lentotuhkan ja hiekan kuljetusmatkan vaikutus ympäristökuormitukseen lentotuhkarakenteessa LT3.

Kuvassa 20 vertailtiin lentotuhkan ja hiekan kuljetusmatkan vaikutuksia lentotuhkarakenteen LT3 kokonaiskuormituksiin. Lentotuhkarakenne LT3:n sisältämät eri aineiden massamäärät ovat seuraavat:

Lentotuhka	6 540 t/km
Hiekka	22 940 t/km
Murske	4 480 t/km
Asfaltti	3 600 t/km.

Tässä tutkimuksessa käytetyt kuljetusmatkat ovat hiekalle 50 km ja lentotuhkalle 10 km. Alin palkki kuvaa tilannetta, jossa lentotuhkan kuljetusmatka pitenee 50 km:iin. Tällöin kuormitukset kasvavat 0,5–8 %. Suurin vaikutus kuljetusmatkan pitenemisellä on polttoaineen kulutukseen ja hiilimonoksidipäästöihin. Ylin palkki kuvaa tilannetta, jossa hiekan kuljetusmatka lyhenee 10 km:iin. Silloin polttoaineen kulutus laskee 23 % ja energian kulutus laskee 14 %. CO-päästöt vähenevät 24 %, hiukkaspäästöt 21 %, NO_x-päästöt 18 %, CO₂-päästöt 11 % ja VOC-päästöt 7 %. SO₂-päästöihin hiekan kuljetusmatkalla ei ole juurikaan vaikutusta.

Kuljetusmatkan vaikutus päästöihin sekä polttoaineen ja energian kulutukseen on huomattava varsinkin, kun kuljetetaan suuria massamääriä. Yksittäisiin kuormituksiin kuljetusmatkan piteneminen 10:stä 50:een kilometriin vaikuttaa jopa 30 %.

8.3 Vaihtoehtojen ympäristökuormitusten vertailu

Taulukoissa 42, 43 ja 44 ovat yhteenlaskettuna tärkeimmät ympäristökuormitukset päällys- ja pohjarakenteissa sekä läjitysvaihtoehtoissa 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Taulukossa 42 esitetään vertailun vuoksi myös tieliikenteen päästöt olettaen tien liikennemääräksi 7 000 ajoneuvoa/päivä, joista 1 000 on raskaita ajoneuvoja.

Kuvissa 21–25 esitetään eri rakenteiden vertailuja pylväsdiagrammeina. Läjitysvaihtoehtojen ympäristökuormitukset ovat negatiivisina kuormituksina. Vertailuissa tarkastellaan vain osaa kuormituksista, esim. maaperään liukenevat aineet on tarkasteltu erikseen.

Taulukoista ja kuvista selviää, että esimerkkien päällysrakenteiden välillä on eroja ympäristökuormituksissa, mutta erot eivät yleensä ole kovin suuria. Koska rakenteita on tarkasteltu kokonaisuuksina, asfaltin käytön osuus energian kulutuksesta ja ilmapäästöistä on suhteellisen suuri. Tämä tasoittaa näiden kuormitusten osalta rakenteiden välisiä eroja. Samantyyppinen kokonaisuuden tarkastelun tasoittava vaikutus näkyy myös muissa kuormituksissa.

Ympäristökuormituksia vertailtaessa on muistettava, että kyse on kuvitteellisista esimerkkirakenteista. Todellisissa tilanteissa laskenta on tehtävä aina rakennekohtaisesti. Esimerkiksi asfalttikerroksen paksuuden muutos tai pinnoittamattomien rakenteiden käyttö vaikuttaa huomattavasti kokonaiskuormitukseen ja myös rakenteiden välisiin eroihin.

Taulukko 42. Tien päällysrakenteiden ympäristökuormitusten vertailu.

Vaikutus	Yksikkö	LT1	LT2	LT3	BM1	BM2	MK	V1	Liikenne ²
Raaka-aineet	t/km								
-luonnonraaka-aineet		28 700	31 200	31 000	37 800	33 200	20 000	46 300	
-uusioraaka-aineet		12 000	6 410	6 410	8 860	14 100	13 100	-	
Yhteensä		40 700	37 600	37 400	46 650	47 350	33 060	46 300	
Vesi	t/km	-	450	450	340	540	250	760	
Polttoaineen kulutus	m ³ /km	100	83	65	76	63	63	80	12 700
Energian kulutus	MWh/km	1 470	1 250	1 050	1 150	793	1 060	1 160	120 200
Päästöt ilmaan									
-CO	kg/km	1 120	900	650	800	760	600	830	459 000
-NO _x	kg/km	3 800	3 400	2 900	3 300	2 600	2 800	3 440	354 000
-hiukkaset ³	kg/km	360	310	260	300	250	260	315	22 000
-SO ₂	kg/km	610	530	440	450	280	425	460	4 000
-CO ₂	t/km	562	449	346	373	263	338	380	31 500
-VOC	kg/km	980	870	740	790	550	720	800	86 000
-pöly ¹ (2–40 m)	kg/km	3 020	8 540	8 540	4 200	3 800	3 100	14 000	
Päästöt maaperään	kg/km								
-sulfaatti		9 000	5 800	5 800	7 100	9 900	ei mit.		
-kloridi		1 100	580	580	180	270	ei mit.		
-molybdeeni		29	17	17	ei mit.	ei mit.			
-vanadiini		8	8	8	ei mit.	ei mit.	<0,013		
-kromi		3,2	1,7	1,7	1,2	1,7	<0,013		
-kupari		0,057	0,035	0,035	0,66	0,85	0,052		
-alumiini		ei mit.	ei mit.	ei mit.	0,097	0,11	ei mit.		
-kadmium		0,0009	0,0006	0,0006	ei mit.	ei mit.	0,0052		
Maan käyttö									
Melu	dB(A) • h • 1 000	158	161	160	229	232	153	246	

¹ murskaus-, kuormaus- ja kuljetusvaiheiden pöly (ei sisällä pakokaasujen hiukkasia).

² liikenteen kuormitukset 50 vuoden aikana, oletettu liikennemäärä 7000 ajoneuvoa/päivä, joista 1000 raskaita ajoneuvoja. Raskaat ajoneuvot oletettu dieselkäyttöisiksi, muut bensiinikäyttöisiksi (Mäkelä et al. 1996).

³ työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöt.

Taulukko 43. Lämmitysvaihtoehtojen vertailu.

Vaikutus	Yksikkö	BM1L	BM2L	LT1L	LT2L
Raaka-aineet	t/yksikkö				
-luonnonraaka-aineet		-	-	6 010	3 200
-uusioraaka-aineet		8 860	14 100	12 000	6 410
Yhteensä		8 860	14 100	18 000	9 600
Vesi	t/yksikkö	-	-	-	-
Polttoaineen kulutus	m ³ /yksikkö	2,9	4,7	10,5	5,6
Energian kulutus	MWh/yksikkö	23	36	750	400
Päästöt ilmaan					
-CO	kg/yksikkö	65	103	190	102
-NO _x	kg/yksikkö	120	190	340	180
-hiukkaset ²	kg/yksikkö	12	19	36	19
-SO ₂	kg/yksikkö	5	8	24	13
-CO ₂	t/yksikkö	8,2	13	30	16
-VOC	kg/yksikkö	21	34	64	34
-pöly ¹ (2–40 m)	kg/yksikkö	35	55	450	240
Päästöt maaperään	kg/yksikkö				
-sulfaatti		8 000	12 700	12 000	6 300
-kloridi		180	290	1 200	620
-molybdeeni		ei mit.	ei mit.	34	18
-vanadiini		ei mit.	ei mit.	19	10
-kromi		1,3	2,1	3,4	1,8
-kupari		0,71	1,1	0,07	0,037
-alumiini		0,12	0,18	ei mit.	ei mit.
-kadmium		ei mit.	ei mit.	0,0014	0,0008
Maan käyttö	m ² /yksikkö	350	565	1 190	640
Melu	dBA • h	18 000	28 800	57 200	30 600

¹ murskaus-, kuormaus- ja kuljetusvaiheiden pöly (ei sisällä pakokaasujen hiukkasia)

² työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukkaspäästöt

Kuvassa 21 verrataan lentotuhkarakenteiden LT2 ja LT3, niiden lämmitysvaihtoehdon ja luonnonkivirakenteen V1 ympäristökuormituksia. Lentotuhkarakenteiden LT2 ja LT3 välisestä erosta nähdään sementin aiheuttama kuormitusten ero. Vertailtavista vaihtoehdoista suurimmat kuormitukset ovat sementtiä sisältävällä lentotuhkarakenteella LT2.

Kuvassa 22 on vertaillaan betonimurskerakenteen BM1 ja sen lämmitysvaihtoehdon sekä masuunikuona- ja luonnonkivirakenteiden ympäristökuormituksia.

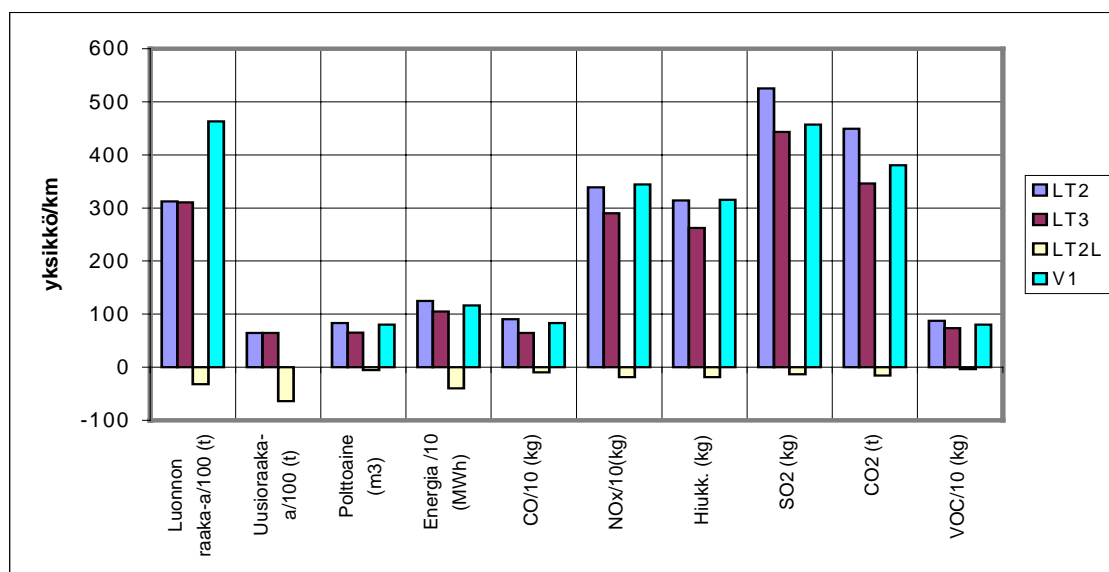
Kuvassa 23 on vertaillaan lentotuhka- ja betonimurskerakenteista, niiden läjitysvaihtoehtoista sekä masuunikuonarakenteesta maaperään liukenevien aineiden määriä 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Kuvassa 24 verrataan päällysrakenteiden ja kuvassa 25 eri pohjarakenteiden ympäristökuormituksia.

Taulukko 44. Pohjarakenteiden ympäristövaikutusten vertailu.

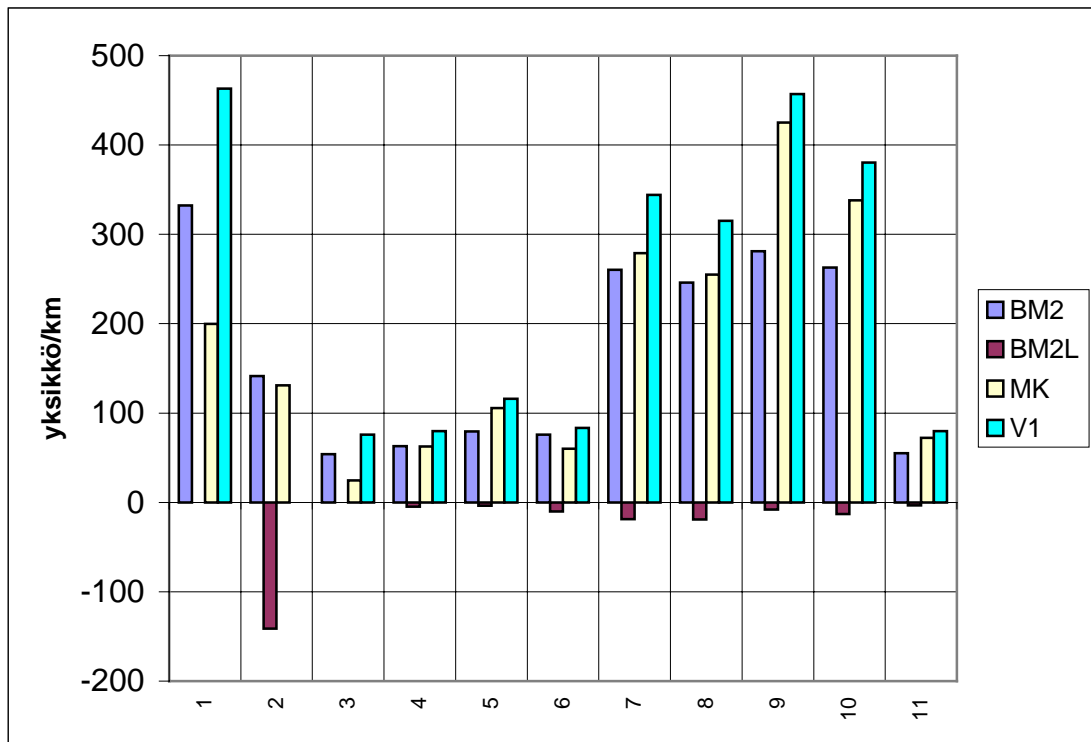
Vaikutus	Yksikkö	Massa-stabilointi	Massan-vaihto	Syvä-stabilointi	Pysty-ojitus
Raaka-aineet	t/km	13 600	170 000	7 400	5 800
Vesi	t/km	-	-	-	-
Polttoaineen kulutus	m ³ /km	1 190	160	400	120
Energian kulutus	MWh/km	12 900	1 200	4 400	1 100
Päästöt ilmaan					
-CO	kg/km	16 900	3 300	5 850	1 700
-NO _x	kg/km	33 500	5 900	11 960	4 500
-hiukkaset ²	kg/km	3 500	620	1 220	480
-SO ₂	kg/km	5 500	260	1 890	220
-CO ₂	t/km	6 750	420	2 310	330
-VOC	kg/km	620	1100	3 120	670
-pöly ¹ (2–40 m)	kg/km	1 540	1 800	620	14 000
Maan käyttö	m ² /km	20 000	20 000	20 000	20 000
Melu	dBA • h	250 000	933 000	29 000	616 000

¹ murskaus-, kuormaus- ja kuljetusvaiheiden pöly (ei sisällä pakokaasujen hiukkasia).

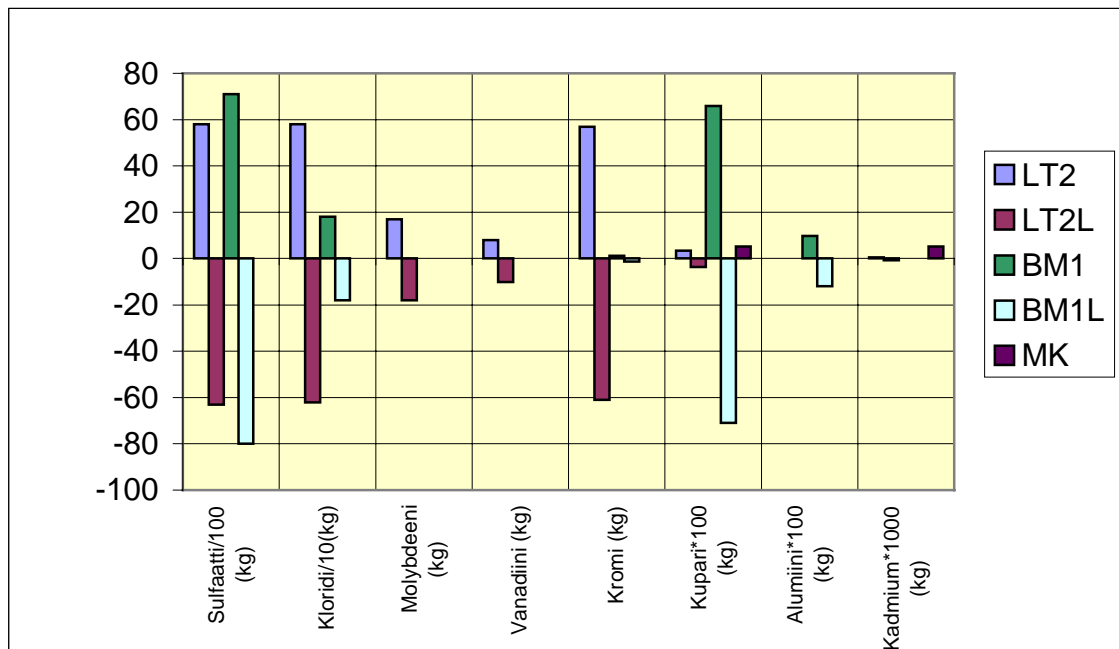
² työkoneiden ja kuljetusten pakokaasujen sekä energiantuotannon hiukaspäästöt.



Kuva 21. Lentotuhkarakenteiden LT2 ja LT3, niiden läjitysvaihtoehdon ja luonnonkivirakenteen V1 ympäristökuormitusten vertailu.

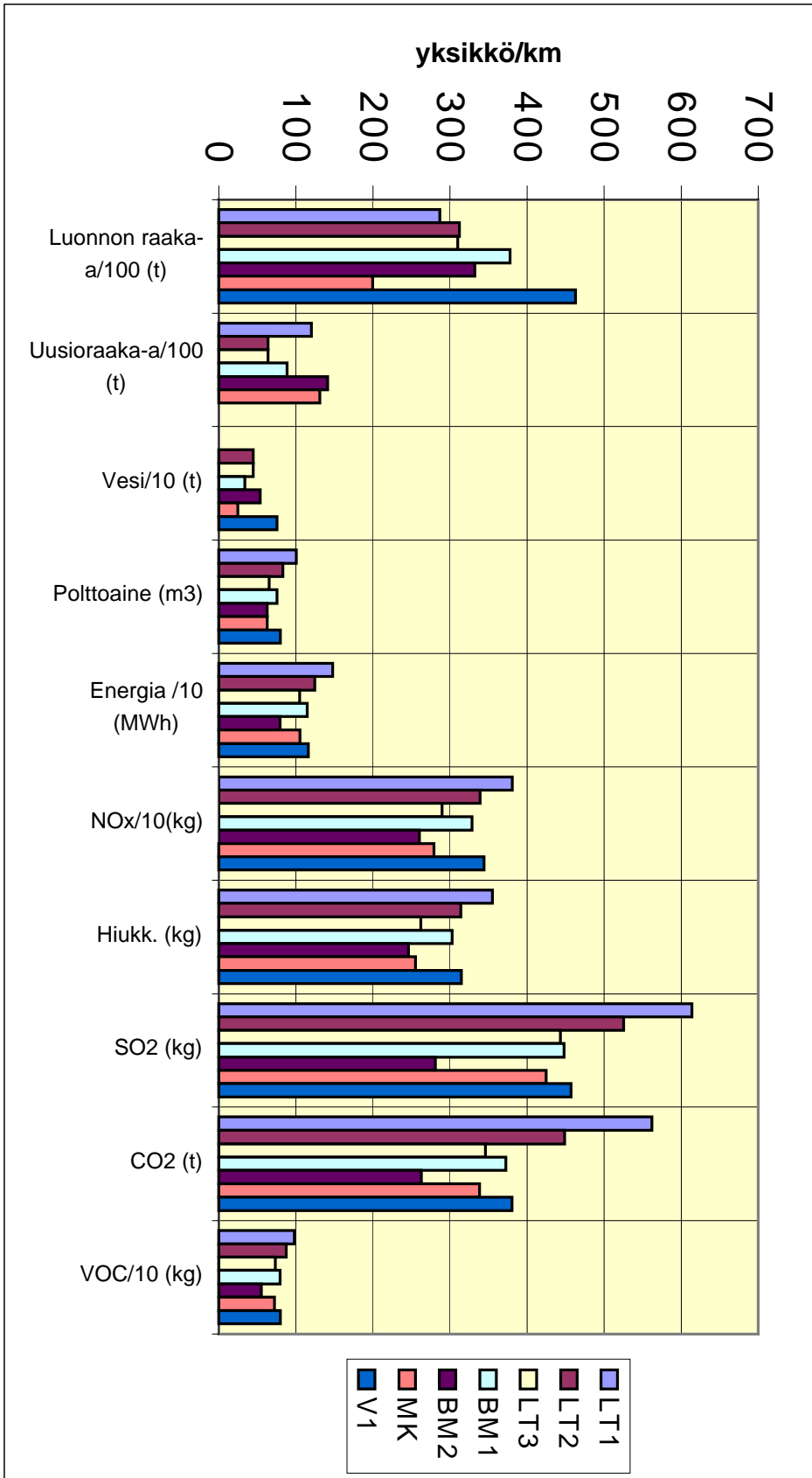


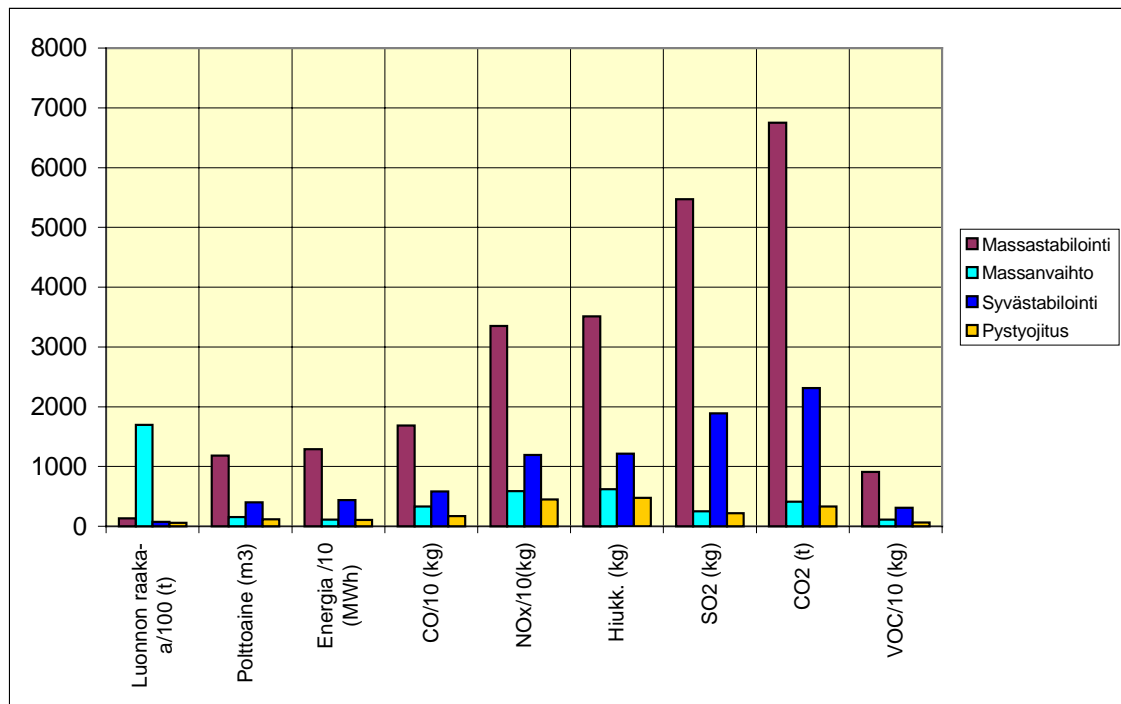
Kuva 22. Betonimurskerakenteen BM1 ja sen läjitysvaihtoehdon sekä masuunikuona- ja luonnonkivirakenteen V1 ympäristökuormitusten vertailu.



Kuva 23. Rakenteista LT2, BM1 ja MK sekä niiden läjitysvaihtoehdoista liukenevien aineiden määrien vertailu.

Kuva 24. Tien päällysrakenteiden ympäristökuormitusten vertailu.





Kuva 25. Tien pohjarakenteiden ympäristökuormitusten vertailu.

8.4 Ympäristökuormitusten merkittävyyden arviointi

Elinkaarianalyysin ympäristövaikutusten arvioinnin tavoitteena on muuntaa inventaarin tulokset helpommin käsiteltävään ja toisiinsa verrannolliseen muotoon. Vaikutusten arviointi sisältää ympäristökuormitusten luokittelun eri ryhmiin potentiaalisten vaikutusten perusteella, karakterisoinnin, jolla tarkoitetaan päästöjen ja muiden ympäristökuormitusten painottamista ryhmän sisällä mahdollisen vaikutuspotentiaal mukaan, ja arvottamisen, jolla tarkoitetaan ympäristövaikutusten painottamista toistensa suhteen.

Arvottamisella tarkoitetaan elinkaarianalyysin inventaarin tai vaikutusanalyysin tuloksena saatujen erilaisten ympäristökuormitus- tai vaikutustietojen merkityksen arviointia siten, että vaikutukset voidaan painottaa suhteessa toisiinsa ja niitä pystytään vertaamaan. Painottamisen jälkeen esimerkiksi epäpuhtauksien liukoisuus maaperään, luonnonmateriaalien käyttö ja hiilidioksidipäästöt on suhteutettu toisiinsa siten, että niitä voidaan suoraan vertailla.

Arvottamismenetelmien käytön etuna on tulosten käsittelyn yksinkertaisuus. Lopputuloksena saadaan joko yksi ympäristökuormitusindeksi tai toisiinsa verrannollisia pistelukuja sisältävä vaikutusmatriisi. Tulosten jatkokäyttö ei vaadi käyttäjältä asiantuntemusta, ja ne voidaan sellaisinaan liittää esimerkiksi pisteytystä vaativiin asiantuntijajärjestelmiin. Järjestelmä voidaan tällöin luoda sellaiseksi, että

ympäristövaikutusindeksiä voidaan edelleen verrata kustannusindeksiin tai teknistä kestävyyttä kuvaavaan indeksiin. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että ympäristölle on annettu merkityskerroin suhteessa muihin arvioituihin tekijöihin.

Mahdollisimman yleisesti hyväksyttävissä olevien ja luotettaviksi koettujen merkityskerrointen luominen onkin arvottamisen suurimpia ongelmia. Lisäksi tulosten käyttäjät haluavat yleensä tietää, mihin päätös tietyn vaihtoehdon paremmuudesta perustuu. Asiantuntijoiden luomat pisteytykset herättävät tämän takia usein epäluuloa ja vaikeuttavat käyttäjän mahdollisuuksia arvioida itse tulosten merkitystä. Arvottaminen merkitsee asiantuntijoiden vaikutusvallan kasvua päätöksenteossa, minkä pelätään johtavan kansalaisten vaikutusmahdollisuuksien vähenemiseen ja yksipuolisten näkemysten korostumiseen.

8.4.1 Arviointimenetelmät

Elinkaarianalyysien tulosten arviointiin on ehdotettu useita menetelmiä, joista mitään ei voida pitää yleisesti hyväksyttynä tai kaikkiin tilanteisiin soveltuvina (Lindfors et al. 1995). Tunnetuimpia niistä ovat ruotsalainen EPS-menetelmä, vaikutus-kategoriamenetelmä, jota on kehitetty mm. Hollannissa ja Ruotsissa, sekä sveitsiläisen BUWALin kehittämä ekopisteytysmenetelmä.

Ympäristövaikutusten arvottaminen voidaan elinkaarianalyysien tulosten käsittelyn lisäksi yhdistää mm. YVA-prosessiin tai muuhun ympäristöä koskevaan päätöksentekoon. Arvottaminen on suhteellisen uusi alue, jossa vasta ollaan kehittämässä periaatteita, menetelmiä ja soveltamisalueita. Suomessa tutkimus on keskittynyt toistaiseksi suhteellisen harvoihin yksiköihin, joista osalla kuitenkin on jo useamman vuoden kokemus menetelmien kehittämisestä ja soveltamisesta. Keskeisimpinä menetelminä ovat olleet taloudellinen arvottaminen, jossa pyritään eri tavoin arvioimaan todelliset ympäristökustannukset, ja monitavoitteiset päätösanalyttiset menetelmät, joissa erilaisia vaikutuksia tai päätöksenteon osakriteerejä pyritään painottamaan suhteessa toisiinsa. Näiden lisäksi käytetään erityyppisiä pisteytysmenetelmiä, joita useimmiten voidaan pitää edellä mainittujen menetelmien supistettuina tai rajattuina versioina.

8.4.2 Menetelmien soveltuvuus tierakenteiden vertailuun

Rakenteiden ympäristökuormitusten laskentaa täydentävän pisteyttävän vertailumenetelyn luominen asetettiin tutkimuksen yhdeksi tavoitteeksi, koska arviointimenettelyn toivottiin jatkossa soveltuvan käytettäväksi myös muiden suunnittelujärjestelmien, mm. kehitteillä olevan tierakenteiden elinkaari-kustannusanalyysin, yhteydessä. Nämä järjestelmät edellyttävät, että tulokset voidaan esittää yksinkertaisina, toisiinsa verrannollisina

lukuarvoina. Lisäksi haluttiin helpottaa arviointia tapauksissa, joissa tekijä ei ole syvemmin perehtynyt ympäristövaikutuksiin. Yhtenä tavoitteena oli myös hankkia arviointimenettelyn laadintaa ja rajausten asettamista helpottavaa tausta-aineistoa ja saada laajempi näkemys käsiteltyjen ympäristökuormitustietojen merkittävydestä.

Tierakenteiden vertailuun soveltuvan menettelytavan löytämiseksi arvioitiin muutamien tavallisimmin käytettyjen arvottamismenettelyjen soveltuvuutta. Menettelytavalta edellytettiin muun muassa seuraavaa:

- Maarakenteiden erityispiirteiden, kuten luonnonraaka-aineiden ja maan käytön sekä maaperään kulkeutuvien haitta-aineiden merkityksen, huomioon ottaminen.
- Menettelyn selkeys ja yksinkertaisuus, menettelyn perusteiden olisi oltava helposti ymmärrettävissä ja menettelytavan mahdollisimman laajasti hyväksyttävissä.
- Menettely olisi voitava liittää arviointiin valinnaiseksi vaiheeksi siten, että tulokset esitetään myös ympäristökuormituksina ja haluttaessa pisteytettynä.

Mahdollisina vaihtoehtoina tarkasteltiin alustavasti elinkaariarviointiohjelmissä käytettyjä vertailumenettelyjä, taloudellista arvottamista, asiantuntija-arviointeihin perustuvaa arvottamista sekä vertailua tavoitearvoihin. Elinkaariohjelmien vertailumenettelyt todettiin sellaisenaan suhteellisen huonosti soveltuviksi, koska maarakentamisessa painotukset ovat hyvin erilaisia kuin tavanomaisimmissa kulutustuotesovellutuksissa. Ympäristökustannusarviointia puoltaa lopputuloksena saatavan kustannusarvion ymmärrettävyys ja vertailtavuus muihin taloudellisiin arviointeihin. Tielaitos on myös jo arvioinut liikenteen päästöjen ympäristökustannuksia. Maarakennuksessa merkityksellisiä luonnonvarojen ja maan käyttöön ym. liittyviä ympäristökustannuksia ei näissä arvioissa ole mukana. On myös huomattava, että kaikki arvot eivät ole taloudellisia. Lisäksi ympäristökustannusten arviointi on menettelynä monimutkainen ja siihen liittyy runsaasti epävarmuuksia.

Vertailua tavoitearvoihin pidettiin harkinnanarvoisena vaihtoehtona. Ongelmaksi muodostui kuitenkin monien kuormitusten osalta yksiselitteisten tavoitearvojen puute. Tällöin itse tavoitearvojen valinta on jo arvotuskysymys.

8.4.3 Ympäristökuormitusten vertailu asiantuntija-arvioiden perusteella

Edellä esitetyn perusteella päätettiin luoda alustava ehdotus pisteyttäväksi vertailumenettelyksi asiantuntija-arvioiden perusteella. Arvioinnissa käytettävän tausta-aineiston hankkimiseksi tehtiin kaksi kyselyä, joissa vastaajia pyydettiin arvioimaan taulukon 44 luettelossa esitettyjen maarakentamisessa syntyvien ympäristökuormitusten haitallisuutta ja merkitystä toisiinsa verrattuna. Kyselyt tehtiin Sivutuotteet maarakenteissa –projektin seminaarin osanottajille, joilta saatiin 34 vastausta, ja VTT

Kemiantekniikan yhden tutkimusryhmän jäsenille (8 henkeä). Seminaarin osanottajat olivat tutkimuslaitosten, sivutuotteita tuottavien yritysten, tie- ja maarakentajien sekä ympäristöviranomaisten edustajia.

Kummassakin kyselyssä vastaajia pyydettiin pisteyttämään ympäristökuormitukset toisiinsa verrattuna. Kyselyissä käytettiin jonkin verran toisistaan poikkeavia vertailuas-teikkoja ja kysymysten asettelua:

- a) Ympäristökuormitusten pisteytys asteikolla 0–100 siten, että merkittävimmäksi arvioidulle annetaan 100 pistettä;
- b) Ympäristökuormitusten vertailu luonnonmateriaalien käyttöön vapaata pisteasteikkoa käyttäen siten, että luonnonmateriaalien käytölle annettiin peruspisteet 1 000. Arvioijille annettiin lisäksi toisella kyselykierroksella mahdollisuus harkita ensimmäistä arviotaan uudelleen kokonaistulosten perusteella.

Kyselyjen tulokset ovat taulukossa 45, jossa on esitetty ympäristökuormitustekijöille annettujen pisteiden keskiarvo (asteikko 0–100) ja keskiarvot muunnettuna suhteellisiksi arvoiksi asteikolla 0–10. Tätä suhteellista pisteytystä kokeiltiin myös tutkimuksen esimerkkirakenteiden vertailuun. Tämän kokeilun tuloksia on kohdassa 8.4.4.

Kahden vastaajaryhmän arviot merkittävimmistä ja vähiten merkittävistä ympäristökuormituksista maarakentamisessa olivat suhteellisen yhtenäisiä, vaikka vaihteluväli vastauksissa olikin suuri. Taulukossa 45 esitettyjen tulosten lisäksi laskettiin mm. pisteiden keskihajonta, joka osoitti, että pääosa pisteistä on keskittynyt lähelle samaa tasoa. Merkittävimpänä esitetyistä ympäristöä kuormittavista tekijöistä pidettiin luonnonraaka-aineiden käyttöä ja raskasmetallipäästöjä maaperään sekä polttoaineiden ja energian käyttöä. Vähiten merkittäviksi katsottiin inertti jäte, veden käyttö ja melu. Näiden välille jäävien kuormitusten osalta hajonta oli suurempi eikä merkittävyysjärjestys ollut kaikilta osin kovin selkeä.

Vastaajaryhmien väliset erot näkyivät mm. kaatopaikkajätteen, hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöjen sekä jossakin määrin maaperään liukenevien aineiden merkityksen arvioinnissa. VTT:n tutkimusryhmässä lähes kaikki olivat osallistuneet sivutuotteiden maarakennuskäytön ympäristövaikutustutkimukseen ja painottivat siksi vertailuryhmää selkeämmin nimenomaan maarakennukseen liittyviä tekijöitä. Myös vertailuryhmän jäsenet olivat kuitenkin joko pääasiassa tai osana työtään käsitelleet maarakennukseen tai sivutuotteiden käyttöön liittyviä asioita. Liukenevien raskasmetallipäästöjen merkitys korostui molemmissa kyselyissä ehkä odotettua enemmän, mikä saattaa osaltaan johtua siitä, että useimmille osallistujille kysymys on hyvin ajankohtainen.

*Taulukko 45. Kahden asiantuntijaryhmän arvio tierakentamisen ympäristökuormitusten merkityksestä toisiinsa verrattuna. Ryhmään 1 kuului 34 tutkimuslaitosten, viranomais-
ten ja maarakentajien edustajaa. Ryhmään 2 kuului 8 VTT Kemiantekniikan yhden tut-
kimusryhmän jäsentä.*

Ympäristökuormituste- kijä	Ryhmä 1			Ryhmä 2		
	Sijaluk- u	Pisteiden keskiarvo	Suht. pisteet 10- asteikolla	Sijaluku	Pisteiden keskiarvo	Suht. pisteet 10- asteikolla
Luonnon raaka- aineiden käyttö	1	75,6	10	2	67,2	10
Raskasmetallit maa- perään	2	66,9	9	1	68,1	10
Polttoaineiden käyttö	3	57,6	7,5	4	49	7
Energian käyttö	4	56,3	7,5	6	42	6
Kaatopaikkajäte	5	52,2	7	13	27,4	4,0
CO ₂ ilmaan	6	50,6	6,5	9	35,4	5
NO _x ilmaan	7	49,5	6,5	3	50,3	7,5
Maan käyttö	8	47,0	6	10	32,3	4,5
Cl maaperään	9	45,2	6	8	37,1	5,5
SO ₂ ilmaan	10	44,4	6	14	27,4	4,0
SO ₄ maaperään	11	44,0	6	11	29,0	4,0
Hiukkaset ilmaan	12	43,4	5,5	7	39,6	6
VOC ilmaan	13	39,9	5	5	42,7	6
N veteen	14	39,4	5	12	27,6	4,0
COD veteen	15	38,6	5	16	25,4	3,5
CO ilmaan	16	38,2	5	15	25,9	4,0
Inertti jäte	17	30,2	4	17	18,2	2,5
Veden käyttö	18	28,8	4	19	9,3	1,5
Melu	19	23,7	3	18	8,4	1,0

Kokonaisuutena voidaan todeta, että käytetty menettely yksinkertaisuudestaan huolimatta antaa suhteellisen hyvän kuvan maarakennuksen ympäristökuormitusten merkityksestä. Sen pohjalta voidaan suunnitella jatkossa toteutettava samantyyppinen, mutta tarkemmin suunnattu ja useampivaiheinen täydentävä arviointi. Kyselytuloksia voidaan alustavan rakenteiden vertailun lisäksi hyödyntää myös koko arviointimenettelyä kehitettäessä.

8.4.4 Esimerkkirakenteiden vertailu

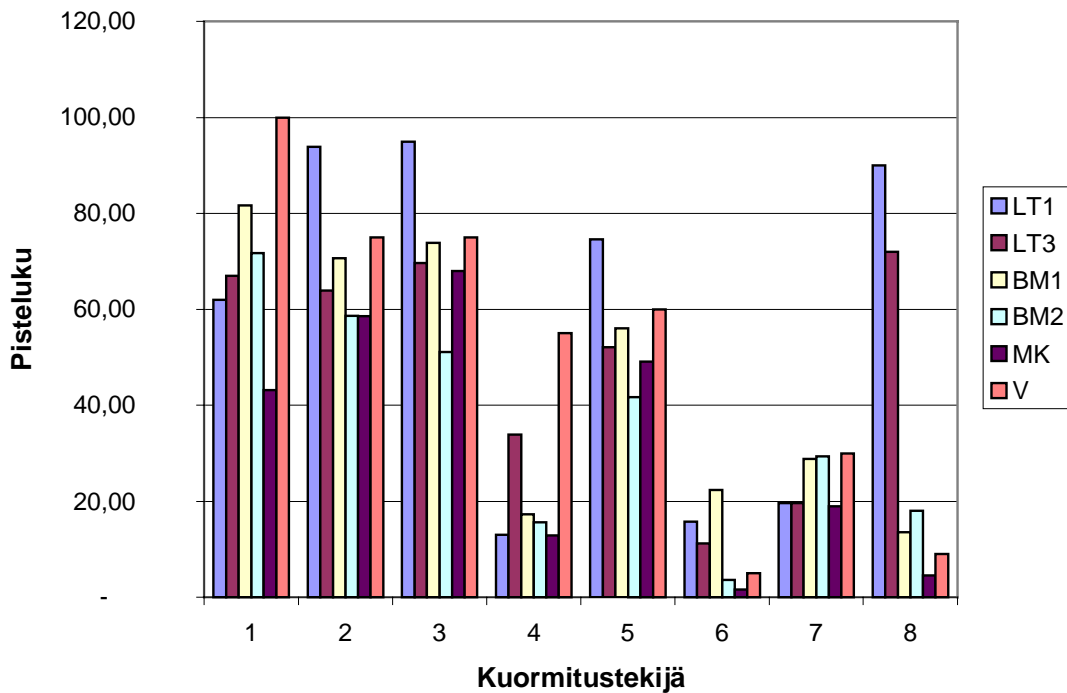
Laadittua alustavaa vertailupisteytystä kokeiltiin esimerkkirakenteiden vertailuun. Tähän vertailuun otettiin mukaan vain päällysrakenteet. Rakenteiden ympäristökuormitusanalyysissä saadut kuormitusmäärät muutettiin suhteelliseksi arvoiksi käyttäen perustasona luonnonmateriaaleista tehtyä vertailurakennetta, jonka kaikille ympäristökuormituksille annettiin suhteellinen taso kymmenen. Muiden rakenteiden kuormitukset muunnettiin tähän verrannollisiksi.

Päästöille ilmaan laskettiin yhteinen vertailupisteluku käyttäen samaa menettelytapaa kuin muiden ympäristökuormitusten keskinäisessä vertailussa. Pölypäästöjä käsiteltiin kuitenkin omana kohtanaan, koska ne ovat peräisin eri lähteistä kuin muut ilmaan joutuvat päästöt ja myös niiden epävarmuustaso on erilainen. Liukoisuuksille ei pystytty laskemaan yhtä tarkkaa suhteellista arvoa kuin muille kuormituksille, koska materiaalien liukoisuustietojen saatavuudessa ja edustavuudessa oli suuria eroja. Maan käyttö jätettiin tässä vaiheessa kokonaan vertailun ulkopuolelle, koska laskentaperusteita on vielä tarkennettava.

Suhteellisten ympäristökuormitustasojen laskennan jälkeen tärkeimmät ympäristökuormitusryhmät suhteutettiin toisiinsa kertomalla kuormituspisteet taulukossa 45 esitetyillä asiantuntijaryhmän arvion perusteella saaduilla vertailupisteillä. Vertailupisteinä käytettiin ryhmän 1 pisteytystä. Toteutetun alustavan vertailun tulokset ovat kuvissa 26 ja 27.

Kuvan 26 perusteella voidaan vertailla tarkasteltuja esimerkkirakenteita ja ne antavat myös suuntaa antavia tietoja materiaalien käytön ja rakennetyypin vaikutuksista ympäristökuormitukseen. Kuten vertaamalla kuvan kahta lentotuhkarakennevaihtoehtoa nähdään, materiaalivalinnan lisäksi materiaalin käyttötavalla ja mahdollisesti tarvittavilla lisäaineilla on huomattava vaikutus moniin ympäristökuormitukseen. Erityisesti sementin käyttö lisäaineena kasvattaa sekä polttoaineiden ja energian kulutusta että päästöjä ilmaan. Myös paikalliset olosuhteet, kuten kuljetusmatkat, ovat merkittäviä ilmaan joutuvien päästöjen ja polttoaineen käytön osalta. Tämän vuoksi on tärkeää tarkastella rakennevaihtoehtoja kokonaisuutena.

Tierakenteiden vertailu



Kuva 26. Esimerkkirakenteiden pisteytettyjen ympäristökuormitusten vertailu. Liukoisuuskien vertailu on alustava, koska materiaaliakohtaisten tietojen saatavuudessa ja tasossa oli huomattavia eroja. Kuvan rakennevaihtoehdot ovat:

V – luonnonmateriaalirakenne

MK – masuunikuonarakenne

BM2 – betonimurskerakenne 2

BM1 – betonimurskerakenne 1

LT3 – lentotuhkarakenne 3

LT1 – lentotuhkarakenne 1.

Vertailtavat ympäristökuormitustekijät ovat:

1 – luonnonmateriaalien käyttö

2 – polttoaineen käyttö

3 – energian kulutus

4 – hiukkaspäästöt ilmaan

5 - kaasumaiset päästöt ilmaan (CO₂, NO_x, SO₂, VOC, CO)

6 – veden käyttö

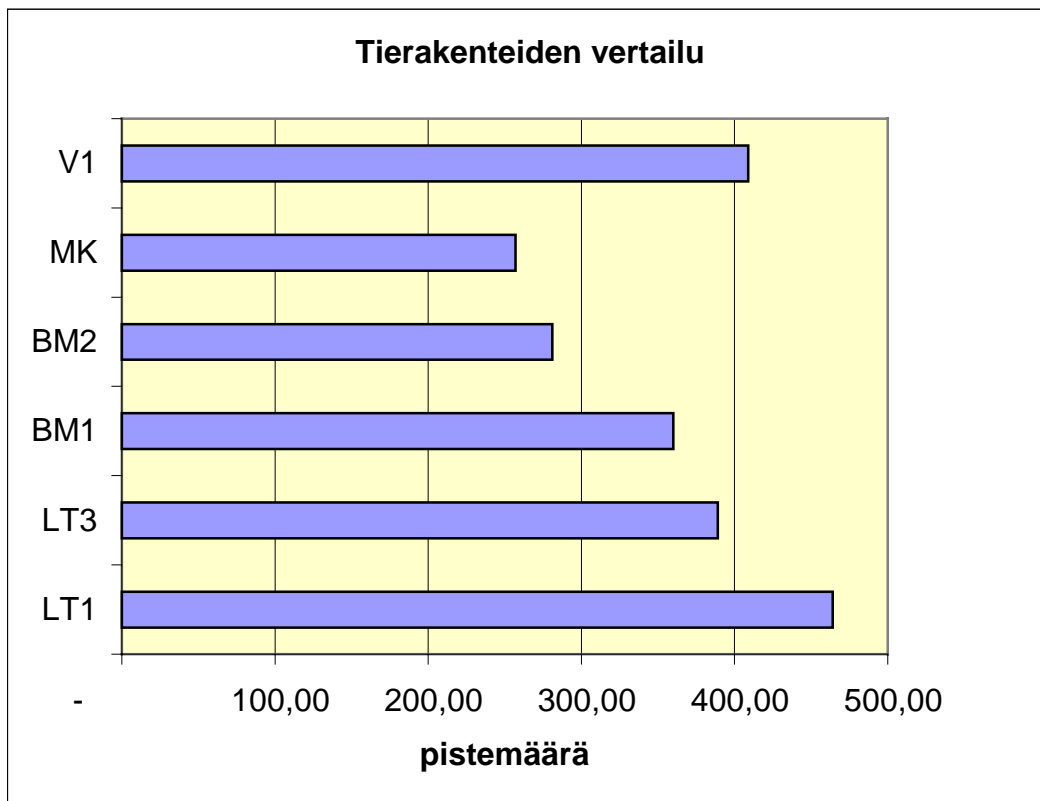
7 – melu

8 – haitta-aineiden liukoisuus.

Rakennevaihtoehdoja verrattaessa havaitaan myös, että vaihtoehtojen väliset erot eivät kaikilta osin ole kovin suuria ja toisaalta erottavat tekijät vaikuttavat eri suuntiin. Tällöin myös sillä, miten merkittävänä tiettyä kuormitustekijää pidetään, on selvä vaikutus vertailun lopputulokseen. Tehdyssä vertailupisteytyksessä merkittävimpiä pidettiin luonnonmateriaalien käyttöä ja materiaaleista liukenevia aineita. Käytettyihin ohjearvotasoihin verrattuna merkittäviä määriä liukeni ainoastaan lentotuhkasta, jossa erityisesti molybdeenin liukoisuus on korkeahko. Betonimurskerakenteissa liukoisuudet ovat lähellä vastaavia luonnonmateriaalirakenteita ja masuunikuonarakenteessa

kokonaisliukoisuudet jäivät luonnonmateriaalirakenteita pienemmiksi. Luonnonmateriaalien käyttö on, kuten odotettavissa on, sivutuoterakenteissa vähäisempää kuin vertailurakenteissa.

Muista vertailutekijöistä energian ja polttoaineiden käyttö sekä päästöt ilmaan aiheutuvat pääosin kuljetusten ja työkoneiden polttoaineiden käytöstä sekä materiaalien, erityisesti sementin ja asfaltin, valmistuksen energiankulutuksesta. Hiukkaspäästöjä syntyy pölyviä materiaaleja, kuten lentotuhkaa, käsiteltäessä sekä materiaaleja murskattaessa. Hiukkaspäästöjen vertailua hankaloittaa kuitenkin käyttökelpoisen tiedon puute, joka on ongelmana myös mm. luonnonmateriaaleista liukenevien aineiden määriä arvioitaessa. Kuvassa 27 on esitetty esimerkkirakenteiden vertailu laskettujen kokonaispisteiden perusteella. Tulokset antavat suuntaa antavan kuvan tarkasteltujen esimerkkien ympäristövaikutuksista, mutta ne eivät edellä esitetyistä syistä ole sellaisinaan sovellettavissa materiaalien vertailuun yleensä.



Kuva 27. Edellisessä kuvassa esitetyn vertailun tuloksena saadut kokonaispisteet kullekin rakennetyypille. Rakenteet ovat :

V – luonnonmateriaalirakenne

MK – masuunikuonarakenne

BM2 – betonimurskerakenne2

BM1 – betonimurskerakenne 1

LT3 – lentotuhkarakenne3

LT1v – lentotuhkarakenne 1.

9. Suositukset arviointimenettelystä

9.1 Lähtökohdat

Tutkimuksen alkuperäiseksi tavoitteeksi asetettiin luoda selkeä ja yksinkertainen elinkaariarvioinnin perusvaatimukset täyttävä menettelytapa maarakenteiden ympäristövaikutusten arviointiin. Ehdotetun menettelytavan perusteella luodaan jatkossa varsinainen arviointimalli. Arvioinnille asetettavien vaatimusten selkeyttämiseksi tehtiin useita esimerkkirakenteiden arvioita. Laskentamenettelynä käytettiin alussa työvaiheittaisia Excel-pohjaisia laskentakaavioita. Menettelytapa ei sellaisenaan sovellu jatkossa käytettäväksi, koska toimitoja ei ole yhdistetty yhtenäiseksi malliksi. Alkuvaiheessa katsottiin vaiheittaisen laskennan antavan laajimman tietopohjan jatkotyölle, koska sen pohjalta on helpointa arvioida eri työvaiheiden tarpeellisuutta ja toteutettavuutta jatkossa.

Esimerkkitarkastelujen tavoitteiden, tarkastelun aikana tarkentuneiden rajausten, rakenteen ja rakennekerrosten määrittelyyn pohjautuvan tarkastelutavan, tarkastelussa mukana olleiden ympäristötekijöiden ja käytetyn tietoaineiston todettiin soveltuvan myös jatkossa tehtävien arviointien perustaksi. Myös ympäristövaikutusten alustavaa vertailumenettelyä pidettiin käyttökelpoisena vaikkakin tarkennuksia ja jatkokehittämistä vaativana. Tavoitteena on laskentamenettelyn liittäminen selkeäksi kokonaisuudeksi, jolloin laskelmat ovat helpommin toistettavissa.

Seuraavassa esitettävät suositukset maarakenteiden elinkaariarvioinnin toteutuksesta perustuvat tässä tutkimuksessa tehtyihin selvityksiin ja esimerkkitarkasteluihin. Arviointi tehdään pääosin noudattaen SETACin (1993) esittämiä periaatteita. Päävaiheet ovat tavoitteen määrittely, inventaari ja tulosten arviointi. Parannusmahdollisuuksien arviointi on jätetty arvion käyttäjän tehtäväksi. Määrittelemällä arvioinneille yhtenäiset rajaukset ja perusmenettelytapa pyritään yhtenäistämään arviointeja, parantamaan tulosten vertailtavuutta ja helpottamaan työtä. Esimerkkitarkastelujen yhteydessä tuotetusta tietoaineiston perusteella pystytään myös laskemaan tiettyjen perusrakenteiden elinkaariarvioita. Tarvittaessa on kuitenkin aina mahdollista muuttaa rajauksia tai laajentaa tarkasteluja lisäämällä perustiedostoon materiaaleja tai toimintovaiheita, joita siinä ei vielä ole mukana.

9.2 Tavoite

Esitettävä arviointimenettely soveltuu eri tavoin toteutettujen maa- ja tierakennevaihtoehtojen vertailuun. Esimerkkitarkasteluissa on vertailtu teollisuuden sivutuotteita käyttäen valmistettuja rakenteita perinteiseen luonnonmateriaaleista valmistettuun rakentee-

seen. Menettelyä voidaan käyttää myös esimerkiksi silloin, kun halutaan selvittää tietyn materiaalin käytön tai toiminnon osuus kokonaisvaikutuksista.

9.3 Rajaukset

9.3.1 Tarkasteltavat toiminnot ja työvaiheet

Tarkasteluun otetaan mukaan kaikki merkittävät elinkaaren vaiheet, joihin kuuluvat materiaalien tuotanto, kuljetukset, sijoitus tierakenteisiin, rakenteen käyttö ja käytön jälkeinen tilanne. Lähtökohtana on, että rakennetta tarkastellaan kokonaisuutena, koska maarakenteissa materiaalivalinta vaikuttaa usein muiden käytettävien materiaalien laatuun ja määrään, työmenetelmiin, kunnossapitotarpeeseen jne. Päällys- ja pohjarakenteita käsitellään erillisinä kokonaisuuksina, jotka yhdistetään tarpeen mukaan. Tämä helpottaa tarkastelua käytännön esimerkeissä.

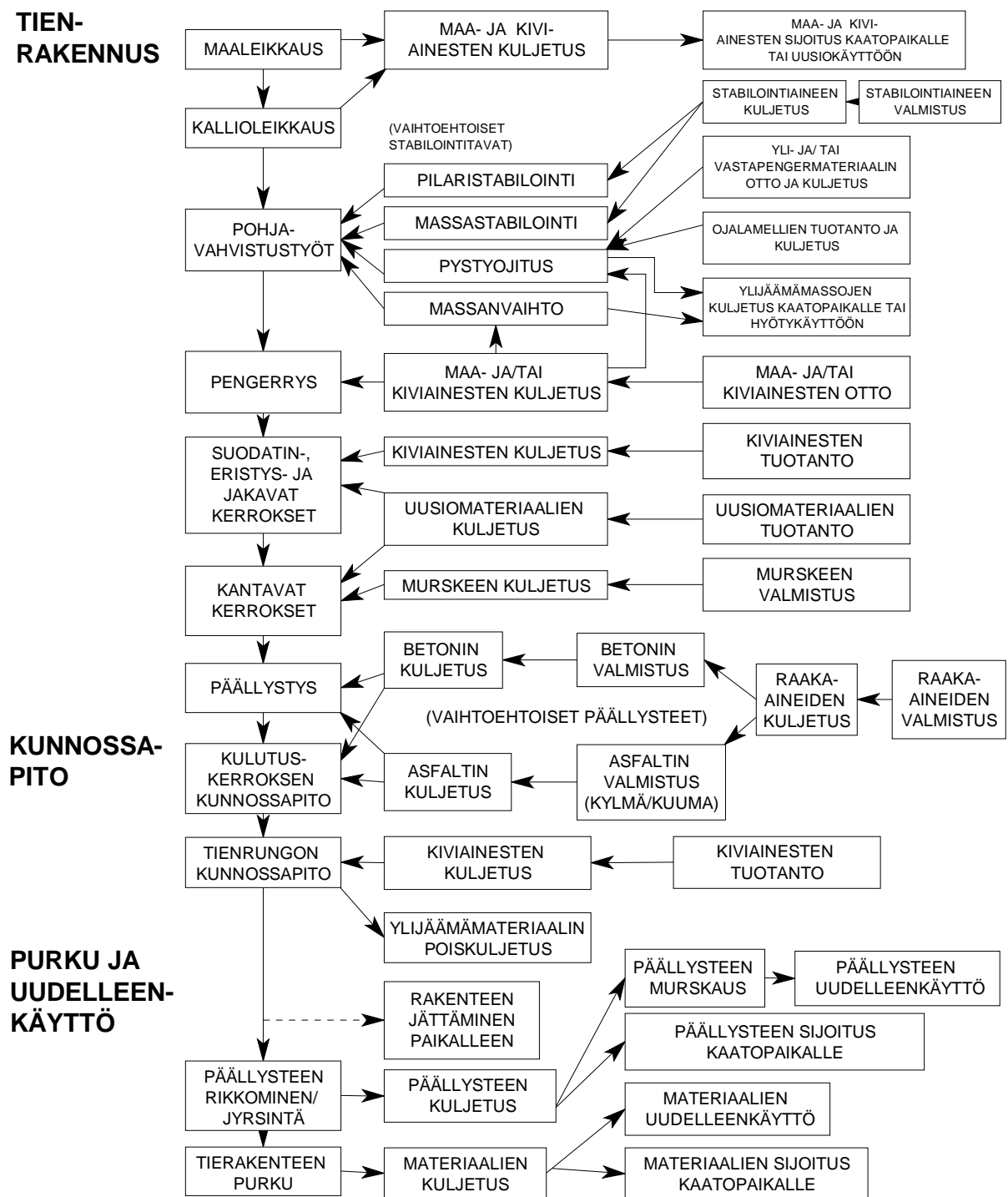
Ympäristökuormitustiedot lasketaan rakenneosaj- ja työvaihekohtaisesti, jolloin pystytään joustavasti tarkastelemaan kulloinkin käsiteltävinä olevia rakennevaihtoehtoja. Rakenne- ja materiaalivertailuissa huomioon otettavat tierakentamisen ja käytön päävaiheet, joista tarkastelumalliin sisällytetään perustiedot, ovat kuvan 28 kaaviossa. Vastaa-va laajennettu kaavio, jossa ovat mukana myös tämän tarkastelun ulkopuolelle jäävät vaiheet sekä rakennusvaiheisiin liittyvät perustoiminnot, on liitteessä 6. Tarkasteluun valitaan kuvissa esitetyistä rakennekerroksista ja toimintavaiheista vain arvioitavan rakennevaihtoehdon valmistukseen ja käyttöön liittyvät vaiheet.

Jos rakenteissa käytetään teollisuuden sivutuotteita, voidaan laskea myös se, miten paljon niitä käyttämällä voidaan vähentää hyötykäytön vaihtoehtona olevan läjitysalue-sijoituksen ympäristökuormituksiin. Tämä edellyttää sitä, että läjitysalue-sijoitus on hyötykäytön todellinen vaihtoehto.

Tierakentamisen ja käytön vaiheista on rajattu kokonaan tarkastelun ulkopuolelle ne vaiheet, joilla ei ole merkitystä rakenteiden vertailun kannalta. Näitä ovat mm.

- raivaustyöt
- tien käyttöön liittyvät toimet, kuten kaistamaalaukset, liikennemerkkien ja valojen asennukset ja käyttö.
- käytön aikainen kunnossapito, kuten auraus, suolaus ja hiekoitus
- liikenteen päästöt. Rakennevertailussa liikenteen päästöillä on merkitystä ainoastaan silloin, jos pystytään määrittämään materiaalin tai rakenteen käytön vaikutus liikenteen päästöihin. Tähän ei toistaiseksi ole riittävästi perustietoa.

TIEN- RAKENNUS



Kuva 28. Tierakenteiden elinkaaritarkasteluissa huomioon otettavat rakentamisen ja käytön päävaiheet.

Tiedon saantiin liittyvien ongelmien vuoksi kaikkia rakennevaihtoehtojen elinkaaren vaiheita voidaan tarkastella täysin tasapainoisesti. Rakenteiden pitkäaikaiskestävyyttä koskevan tiedon ja arviointimenetelmien puutteen vuoksi materiaalien käytön vaikutuksia rakenteiden kunnossapitotarpeeseen ei vielä pystytä luotettavasti vertailemaan. Kunnossapitotarpeen arviointiin voidaan käyttää joko tämän raportin taulukossa 22 (kohta 5.3) esitettyä kunnostusohjelmaa tai rakennekohtaista kunnostustarvearviota, jos sellainen pystytään laatimaan. Joskus materiaalivalinta voi vaikuttaa myös käytön aikaiseen kunnossapitotoon, esimerkiksi siksi, että joillakin uusiomateriaaleilla voi erilaisen lämmöneristävyuden vuoksi olla tien liukkautta lisäävä vaikutus, mikä puolestaan lisää tien suolaamistarvetta. Materiaalien kierrätyksen ja uudelleenkäyttömahdollisuuksien arvioimiseksi on riittävästi tietoa ainoastaan päällystemateriaaleista. Muut rakennekerrokset jäävät yleensä paikalleen käytön jälkeen. Tavoitteena on kuitenkin tarvittaessa pystyä kierrättämään myös rakennekerrosten materiaaleja.

9.3.2 Tarkasteltavat ympäristökuormitukset

Ympäristökuormituksista on tarkasteluun valittu esimerkkien perusteella maarakenteiden elinkaaren aikana oleellisiksi arvioidut kuormitukset. Tarkasteltavat kuormitukset, jotka on jaettu neljään pääryhmään, esitetään taulukossa 46. Taulukossa suluissa mainittujen kuormitustekijöiden merkittävyys arvioitiin niin pieneksi, että tekijät esitetään rajattaviksi jatkossa tehtävien arviointien ulkopuolelle.

Vettä käytetään materiaalien kastelemiseksi optimikosteuteen. Käytettävät vesimäärät ovat materiaalista riippuen 300–3 000 t/km. Vesi ei vaadi esi- tai jälkikäsitteilyä ja myöskin käytöstä aiheutuva polttoaineen kulutus on pieni kokonaisuuteen verrattuna. Muiden kuin materiaalista liukenevien aineiden päästöjä vesistöihin (COD, N) syntyy jonkin verran teollisesti valmistettavien rakennusmateriaalien, mm. bitumin, valmistuksessa, mutta ei itse maarakennuksessa. Tierakentamisessa syntyvät jätteet ovat pääosin luokiteltavissa inerteiksi. Tavanomaista tai ongelmajätettä syntyy lähinnä materiaalien valmistusprosesseissa sekä jonkin verran ajoneuvojen käytössä (mm. jäteöljyt). Onnettomuusriskit päätettiin jättää pois tarkasteluista, koska riittävää tietoa niiden rakennekohtaiseksi vertailemiseksi ei ollut saatavissa.

Taulukko 46. Maarakenteiden elinkaariarvioinnissa tarkasteltavat ympäristö-kuormitukset. Suluissa olevien kuormitustekijöiden merkitystä on arvioitu esimerkkitarkasteluissa, mutta niitä ei suositella otettaviksi jatkossa tehtäviin arviointeihin.

Kuormitusryhmä	Alaryhmä	Yksikkö	
		Lähtötiedot	Tulostiedot
Resurssien käyttö	Mineraaliset luonnonraaka-aineet*	t/pinta-alayksikkö rakennetta	t/km
	Uusioraaka-aineet	t/pinta-alayksikkö rakennetta	t/km
	Energia	kWh/tonni tai m ³ materiaalia	kWh/km
	Polttoaineet ¹	m ³ /ajomatka tai koneen käyttöaika	m ³ /km
	Maan käyttö	Luonnonmateriaalien ottoalueet, tiedot luonnonmateriaalien saatavuudesta, läjitysalueet	Sanallinen arvio maan käytön merkityksestä
	(Veden käyttö)		
Päästöt maaperään/vesistöihin	Materiaaleista liukenevat metallit (esim. As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Se, Pb, Zn)**	mg/kg materiaalia	mg/m ² , (kg/km) ^{***}
	Materiaaleista liukenevat tai kulkeutuvat orgaaniset aineet**	mg/kg materiaalia	mg/m ² , (kg/km) ^{***}
	Cl, SO ₄ **	mg/kg materiaalia	mg/m ² , (kg/km) ^{***}
	(COD ja N veteen)		
Päästöt ilmaan	CO ₂	g/t materiaalia tai g/ajomatka	kg/km
	NO _x		
	SO ₂		
	VOC		
	CO		
	Hiukkaset		
Jätteet	Inerti jäte	kg/t tai m ³ materiaalia	t/km
	(Tavanomainen jäte, ongelmajäte)		
Muut kuormitukset	Melu	dB + kesto min	meluaika/km
	(Onnettomuusriskit)		

* Jatkossa arvioidaan, onko luonnon raaka-aineet tarpeen jakaa ryhmiin esimerkiksi saatavuuden tai raaka-aineen oton ympäristövaikutusten perusteella.

** Tarkasteluun mukaan otettavat aineet valitaan käytettävän materiaalin mukaan (merkittävä lähinnä tietyille teollisuuden sivutuotteille).

*** Materiaaleista liukeneville aineille käytetään tulosten vertailun ja arvioinnin helpottamiseksi ensisijaisena tarkasteluksikkona g:aa/m², jolloin tuloksia voidaan verrata tavoitearvoihin. Liukenevat aineet voidaan kuitenkin tarvittaessa laskea myös tiekilometriä kohti.

1 Polttoaineiden käyttö sisältyy energian kulutukseen, voidaan merkittävyytensä vuoksi esittää myös erillisenä.

9.3.3 Muut rajaukset

Toiminnallinen yksikkö

Toiminnalliseksi yksiköksi, jota kohden tiedot ympäristökuormituksista kerätään, valitaan tierakenteessa kilometrin pituinen tieosuus.

Tarkastelu-aika

Tarkasteluajan tulisi yleensä sisältää tarkasteltavan materiaalin tai tuotteen koko elinkaari raaka-aineen osta käytöstä poistamiseen ja loppusijoitukseen. Tarkastelu-aika ei aina kuitenkaan ole sama kuin tuotteen elinaika. Tierakenteiden elinkaariarvioinnissa tarkasteluajan on oltava riittävän pitkä myös käytön aikaisten vaikutusten arvioimiseksi. Siksi tarkasteluissa käytetään 50 vuoden tarkastelu-aikaa.

Käytettävä tietoa-aineisto

Maarakenteiden arvioinnissa käytetään vaikutusten paikallisen luonteen vuoksi ensi sijassa paikallisia ja materiaalikohtaisia tietoja tai yleistä kotimaista tietoutta, joita täydennetään puuttuvilta osin kansainvälisillä tiedoilla.

Saatavissa olevan tiedon tai kokemusten vähäisyyden vuoksi joudutaan esimerkiksi teollisuuden sivutuotteiden arvioinnissa osittain tyytymään tarkkuustasoltaan heikompiin tietoihin. Tiedostoihin liitetään viittaukset alkuperäislähteeseen ja arvio tiedon tasosta ja kattavuudesta.

9.4 Toteutus ja lähtötiedot

Maarakenteen elinkaariarviointi toteutetaan periaatteessa kuvan 28 mukaisesti. Lähtökohtana on kussakin tapauksessa suunnittelijan määrittelemä tierakenne tai osa rakenteesta, johon tarvittavat materiaalit ja materiaalimäärät sekä työmaalta mahdollisesti poistettavat materiaalimäärät on määritetty. Lisäksi olisi tunnettava työmaalle tuotavien ja sieltä muualle kuljetettavien materiaalien kuljetusmatkat ja kuljetustapa, teollisuuden sivutuotteille käytettävän materiaalin liukoisuustiedot sekä sivutuotteiden läjitysalue-sijoitus huomioonottaessa kuljetusmatkat läjitysalueella. Tietojen puuttuessa voidaan käyttää arvioita keskimääräisistä kuljetusmatkoista ja yleisiä liukoisuustietoja (tiedostot).

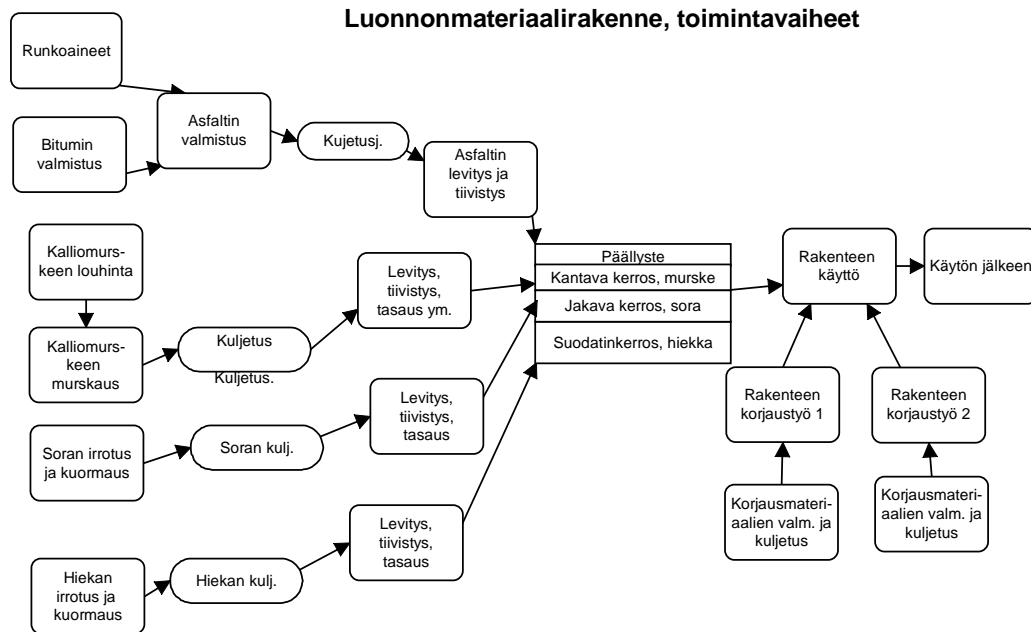
Tavoitteena on yhdistää tietoa-aineisto laskentamalliksi, jota jatkossa voidaan käyttää arvioinnissa. Mallia käytettäessä toteutuksen päävaiheet ovat seuraavat:

- 1 Tavoitteen määrittely. Jos tavoite on muu kuin rakenteiden vertailu, on tarkistettava, vaikuttaako se arvioinnin rajauksiin ja tarkasteltaviin toimintoihin. Erilaisten tarkastelujen tekeminen ja erilaisten rajausten käyttäminen on mahdollista, koska

ympäristökuormitukset ja -vaikutukset lasketaan arviointiohjelmassa kuvan 29 esimerkin mukaisesti vaiheittain. Tavoite ja rajaukset on kuitenkin tällöin määriteltävä selkeästi.

- 2 Periaatteeltaan kuvan 29 mukaisen, mutta tarkennetun toimintakaavion laadinta (virtauskaavio) kaikille vaihtoehdoille tai valmiin soveltuvan toimintakaavion valinta. Kaavioon otetaan mukaan kaikki tavoitteen kannalta merkitykselliset toimintavaiheet. Toimintakaavion perusteella käydään läpi käytettävät materiaalit ja tarkasteltavat toiminnot ja tarkastetaan, löytyvätkö ne jo valmiista materiaali- ja työvaihetiedoista.
- 3 Tiedoista puuttuvien materiaalitietojen hankinta ja lisääminen malliin tarvittaessa (erillinen ohje).
- 4 Vaihtoehtojen ympäristökuormitusten laskenta. Ympäristökuormitukset lasketaan määritettyjen joko valmiista tiedoista saatavien tai laskentamalliin lisättyjen tietojen perusteella sopivaa laskentaohjelmaa käyttäen.
- 5 Tulokset esitetään perusyksikköä kohti laskettuina kokonaiskuormituksina ja lisäksi toimintovaiheittain. Tarkasteltavia vaiheita ovat materiaalien valmistus ja esikäsitteily, materiaalien kuljetukset, sijoitus rakenteeseen, rakenteen käytönaikaiset kuormitukset ja rakenteen käytönjälkeiset kuormitukset. Tulokset voidaan esittää sekä taulukkomuodossa että pylväsdiagrammeina. Teollisuuden sivutuotteita käyttämällä säästetyt materiaalmäärät ja vältetyt läjitysalue-sijoituksen kuormitukset esitetään pylväsdiagrammeissa negatiivisina (säästettyinä) kuormituksina.
- 6 Epävarmuusarvio. Malliin liitetään mahdollisuus tarkastella esimerkiksi kuljetusmatkojen muutosten tai perustietojen epävarmuuksien vaikutusta kokonaistuloksiin. Epävarmimpiin perustietoihin pyritään liittämään arvio vaihteluvälistä, jonka avulla voidaan tarvittaessa tehdä epävarmuustarkasteluja.
- 7 Tulosten arviointi. Tulosten vertailu tehdään laskennassa saatujen ympäristökuormitustietojen perusteella. Vertailun helpottamiseksi tulokset jaetaan taulukossa 45 esitettyihin pääryhmiin. Ympäristökuormitustietojen tukena voidaan jatkossa käyttää myös yksinkertaistettua pisteytysmenettelyä, jonka kehittämismahdollisuuksia on alustavasti selvitetty kohdassa 8.

Kyselyjen perusteella merkittävimpana taulukossa 45 esitetyistä ympäristöä kuormittavista tekijöistä pidettiin luonnonraaka-aineiden käyttöä. Seuraavina olivat raskasmetallipäästöt maaperään sekä polttoaineiden ja energian käyttö. Vähiten merkittäviksi katsottiin CO-päästöt, inertti jäte, veden käyttö ja melu.



Kuva 29. Esimerkki tierakenteen elinkaariarvioinnin periaatteesta. Tiettyjen materiaalien tai rakenneosien tarkastelua varten valitaan koko rakenteen sijasta vain tavoitteen kannalta merkitykselliset osa-alueet.

8 Tulosten raportointi

Tulokset olisi raportoitava niin, että laskentaperusteet ja menetelmät pystytään jäljittämään mahdollisimman pitkälle. Käytännössä raporttiin koottavan yksityiskohtaisen aineiston määrää on kuitenkin rajattava luettavuuden vuoksi.

Raportissa esitetään ainakin seuraavat tiedot:

- tarkastelun tavoitteet, tarkasteltavat vaihtoehdot ja käytetyt rajaukset perusteluineen
- käytetty laskentamenetelmä ja tiedonlähteet
- arvio tietojen luotettavuudesta
- puuttuvat tiedot ja arvio tiedonpuutteiden merkityksestä
- inventaarin tulosten pisteytys- tai arvotusmenettely, jos käytetty
- tulosten arviointi ja vertailu, tehtyjen johtopäätösten perustelut
- lyhyt yhteenvedo.

Arviointi voidaan tehdä myös muita laskentamenettelyjä käyttäen, jolloin käytettävissä on oltava edellä esitettyjen vaiheiden toteuttamiseksi tarvittava tietoaineisto. Jos elinkaariarviointi tehdään tämän julkaisun suositusten mukaisesti, voidaan monien vaiheiden osalta käyttää jo olemassa olevaa valmista tietoaineistoa, joka on löydettävissä tästä julkaisusta ja erillisestä julkaisemattomasta raportista (Eskola 1998).

Lähdeluettelo

Anon 1996a. Vejen mod et bedre miljø. Vejdirektoratets miljøstrategi 1996 - 2000. Vejdirektoratet Rapport nr. 44. 38 s.

Anon 1996b. Tielaitos kestäväällä tiellä. Tielaitoksen ympäristöohjelma 1996. 12 s.

Arovaara, H. 1996. Suullinen tiedonanto.

Besluiten 567. 1995. Bouwstoffenbesluit bodem- en oppervlaktwaterenbescherming. Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden. 92 s.

Blomberg, T. Bitumien ja asfaltin elinkaariarviot. Seminaarissa: Elinkaariarviointi käytännön työkaluna, Neste/VTT, Keilalampi 6.5.1998.

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.

Containerships. 1998. Markus Nyman. Suullinen tiedonanto 27.4.1998.

CROW 1994a. Zo goed als nieuw. Toepassingsmogelijkheden secundaire bouwstoffen voor de wegenbouw. Publikatie 85.

CROW 1994b. Uitloggen op karakter. Handboek Uitloogkarakterisering II Materialen.

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

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

Eskola, P. 1998. Työkoneiden käyttöaikojen, energian- ja polttoaineen kulutuksen ja päästöjen laskeminen maarakentamisen elinkaariarvioinnin yhteydessä (Julkaisematon). 51 s.

Eskola, P. & Mroueh, U.-M. 1998. Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi. VTT Tiedotteita 1898. Espoo. 82 s. + liitt. 11 s.

Geotechnics Holland BV. 1998. Nico Cortlever. Kirjallinen tiedonanto 27.2.1998.

Heijungs, R. et al. 1992. Environmental life cycle assessment of products. Guides 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). H rsholm, Vandkvalitetsinstituttet. 176 s.

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

Häkkinen, T. & Mäkelä, K. 1996. Environmental adaption of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. VTT Research Notes 1752. Espoo. 61 s. + liitt. 32 s.

Häkkinen, T., Vares, S., Vesikari, E., Saarela, K., Tattari, K. & Säteri, J. 1997. Rakennusmateriaalien ja tuotteiden ympäristövaikutukset ja niiden arviointiperusteet. VTT Tiedotteita 1836. Espoo. 137 s.

Jylhä, J. 1992. Tienrakennuksen kustannustiedosto. Diplomityö. TKK Rakentamistalouden laboratorio. 93 s.

Kaitos Oy. 1998. Anton Palolahti. Suullinen tiedonanto 26.2.1998.

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

Koski, P. 1995. Tierakentamisen ympäristökriteerit. Tierakentamisen ja -rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten peruskartoitus. TPPT Työraportti E5, Projekti E41. Espoo. 57 s.

Kälvesten, E. 1996. Miljömässig karakterisering av vägbyggnadsmaterial. Examensarbete. Linköpings Tekniska Högskola. Linköping. 18 s. + liitt.

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

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. 1997. Pia Rämö. Kirjallinen tiedonanto 3.1.1997.

Lohja Rudus 1998. Antti Määttänen. Kirjallinen tiedonanto. 24.1.1998.

Lundström, K. 1998. Suullinen tiedonanto.

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. 1998. Suullinen tiedonanto 27.4.1998.

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

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

Oasmaa K. 1998. Helsingin Energia. Suullinen tiedonanto.

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

Pirilä P., Ranne A., Järvinen P. & Luoma P. 1997. Sähkölle ympäristöluokittelu? Ympäristöluokittelun perusteita. VTT Tiedotteita 1878. Espoo. 71 s.

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

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

Rasimus, K. 1996. Suullinen tiedonanto.

Rasimus, K. 1998. Suullinen tiedonanto.

Rautaruukki 1998. Marko Mäkikyö. Kirjallinen tiedonanto 4.2.1998.

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

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

RIL 166. 1986 Pohjarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. Helsinki.

RIL 170-1987. Asfalttinormit 1987. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 112 s.

Ruostetoja, P. 1996. Kirjallinen tiedonanto.

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

Schuermans-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'. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Brussels. 69 s.

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

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

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

Tie- ja vesirakennushallituksen TS (Tien tekeminen ja työn suunnittelu)-tietokortit.

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.

Tielaitoksen selvityksiä 15/1993. Masuunikuonan käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa. Oulu. 28 s.

Tielaitoksen selvityksiä 23/1997. Masuunikuonan käyttö päällysrakennekerroksissa. Oulu. 36 s.

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

Tomi, H. 1997. Tuhkapölymittaukset Knutersintillä Sipoossa. Mittausraportti 6.10.1997.

Vold, M. & Ronning, A. 1995. LCA of cement and concrete – Main report. Stiftelsen Ostfoldforskning. Fredrikstad. 50 s.

Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. 1996a. Mineraalisen rakennusjätteen kierrätys – Mineraalisen rakennusjätteen laadunvarmistusjärjestelmä. VTT Kemiantekniikka. Julkaisematon.

Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. 1996b. Standardoidut liukoisuustestimenetelmät maarakentamisessa hyötykäytettävien materiaalien ympäristötestauksessa. VTT Tiedotteita 1801. Espoo. 44 s. + liitt. 16 s.

Weiss, N. L. 1985. SME mineral processing handbook. Society of Mining Engineers. New York.

Tien päällysrakennekerrosten kerrospaksuudet, tilavuudet ja massat

Vertailu- rakenne	Rakennusaine	Kerros- paksuus	Teor. rakenne	Tod.irto-	Tod. kiinto-	Tod.kiinto-	Irto- tiheys	Massa	Tiheys	Massa		
			tilavuus (lopull.rakenne)	tilavuus (kuljetus)	tilavuus (varasto)	tilavuus (kallio)		kulj. aikana	rakenteessa	rakenteessa		
			m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	t	kg/m3 rtr	t	
V1	päällyste1	AB 20/120	0,08	800				2000	2500	2000		
	päällyste2	AB 20/120	0,08	640				1600	2500	1600		
	kk	murske(0-35)	0,25	3214	4730	2630	2530	7570		8230		
	jk	sora	0,25	3401	5230	4530		8420		7920		
	sk	hiekk	0,3	4329	6660	5410		9520		10870		
	penger	hiekk (hl)	0,5	7815	12020	9770		17190		19620		
Tuhka- rakenne	Rakennusaine	Kerros- paksuus	Teor. rakenne	Tod.irto-	Tod. kiinto-	Tod.kiinto-	Irto- tiheys	Massa	Tiheys	Massa		
			tilavuus (lopull.rakenne)	tilavuus (kuljetus)	tilavuus (varasto)	tilavuus (kallio)		kulj. aikana	rakenteessa	rakenteessa		
			m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	t	kg/m3 rtr	t	
LT1	päällyste1	AB 16	0,05	500				1250	2500	1250		
	päällyste2	BST	0,15	1200				3000	2500	3000		
	kk	-										
	jk	LT+YSE 2%	0,65	8824	12260	13680		1000	12260	1400	12354	
	sk	hiekk	0,2	2970	4570	3710			6540		7450	
	penger	hiekk (hl)	0,5	7950	12230	9940			17490		19950	
Tuhka- rakenne	Rakennusaine	Kerros- paksuus	Teor. rakenne	Tod.irto-	Tod. kiinto-	Tod.kiinto-	Irto- tiheys	Massa	Tiheys	Massa		
			tilavuus (lopull.rakenne)	tilavuus (kuljetus)	tilavuus (varasto)	tilavuus (kallio)		kulj. aikana	rakenteessa	rakenteessa		
			m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	t	kg/m3 rtr	t	
LT2 (2% YSE)	LT3 (ei YSE)	päällyste1	AB 20	0,08	800				2000	2500	2000	
		päällyste2	AB 20	0,08	640				1600	2500	1600	
		kk	murske(0-35)	0,15	1906	2800	1560	1500	4480		4870	
		jk	LT(+YSE 2%)	0,35	4709	6540	7300		1000	6540	1400	6593
		sk	hiekk	0,2	2760	4250	3450			6080		6930
		penger	hiekk (hl)	0,5	7665	11790	9580			16860		19240
Betoni- murske- rakenne	Rakennusaine	Kerros- paksuus	Teor. rakenne	Tod.irto-	Tod. kiinto-	Tod.kiinto-	Irto- tiheys	Massa	Tiheys	Massa		
			tilavuus (lopull.rakenne)	tilavuus (kuljetus)	tilavuus (varasto)	tilavuus (kallio)		kulj. aikana	rakenteessa	rakenteessa		
			m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	t	kg/m3 rtr	t	
BM1	päällyste1	AB 20	0,08	800				2000	2500	2000		
	päällyste2	AB 20	0,08	640				1600	2500	1600		
	kk	BM (0-50)	0,1	1263	2110			1500	3170	2500	3158	
	jk	BM (0-50)	0,15	1951	3250			1500	4880	2500	4878	
	sk	hiekk	0,55	7730	11890	9660			17000		19400	
	penger	hiekk (hl)	0,5	7815	12020	9770			17190		19620	
Betoni- murske- rakenne	Rakennusaine	Kerros- paksuus	Teor. rakenne	Tod.irto-	Tod. kiinto-	Tod.kiinto-	Irto- tiheys	Massa	Tiheys	Massa		
			tilavuus (lopull.rakenne)	tilavuus (kuljetus)	tilavuus (varasto)	tilavuus (kallio)		kulj. aikana	rakenteessa	rakenteessa		
			m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	t	kg/m3 rtr	t	
BM2	päällyste1	AB 20	0,08	800				2000	2500	2000		
	päällyste2	-										
	kk	BM (0-50)	0,2	2508	4180			1500	6270	2500	6270	
	jk	BM (0-50)	0,2	2628	4380			1500	6570	2500	6570	
	sk	hiekk	0,45	6352	9770	7940			13970		15940	
	penger	hiekk (hl)	0,5	7845	12070	9810			17260		19690	
Masuuni- kuona- rakenne	Rakennusaine	Kerros- paksuus	Teor. rakenne	Tod.irto-	Tod. kiinto-	Tod.kiinto-	Irto- tiheys	Massa	Tiheys	Massa		
			tilavuus (lopull.rakenne)	tilavuus (kuljetus)	tilavuus (varasto)	tilavuus (kallio)		kulj. aikana	rakenteessa	rakenteessa		
			m	m3 rtr	m3 itd	m3 ktd	m3 ktr	kg/m3 itd	t	kg/m3 rtr	t	
MK	päällyste1	AB 20	0,08	800				2000	2500	2000		
	päällyste2	AB 20	0,08	640				1600	2500	1600		
	kk	kuonamurske	0,1	1263	1540	770		1400	2160	1700	2147	
	jk	mas.hiekk	0,25	3289	4510	3870		1100	4960	1500	4934	
	sk	mas.hiekk	0,2	2766	3790	3250		1100	4170	1500	4149	
	penger	hiekk (hl)	0,5	7440	11450	9300			16370		18670	

hl=huonompilaatuinen

Pohjarakenteiden massat ja tilavuudet

Massa-stabilointi	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Pituus	Leveys	Tilavuus	Tilavuus	Tiheys	Massa				
		m	m	m	m ³ rtr	m ³ itd	kg/m ³	t				
stabiloitava massa stabilointiaine	savi sementti	5	1000	17	85000	144500	1500	127500				
							100	8500				
Massanvaihto	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Pituus	Leveys	Tilavuus	Tilavuus	Tiheys	Massa				
		m	m	m	m ³ rtr	m ³ itd	kg/m ³	t				
poiskaivettava massa	savi	5	1000	17	85000	144500	1500	127500				
paikalle tuotava massa	hiekkamoreeni	5	1000	17	85000	127500	2000	170000				
Pilaristabilointi+ massastabilointi (holvauserroksena)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Pituus	Leveys	Tilavuus	Tilavuus	Tiheys	Massa	Pilarien määrä	Pilarin tilavuus	Yhden pilarin pituus	Kokonais- pituus
		m	m	m	m ³ rtr	m ³ itd	kg/m ³	t	kpl	m ³ /m	m	m
massastabiloitava massa	savi	1	1000	15	15000	25500	1500	22500				
stabilointiaine	sementti						100	1500				
stabiloidut pilarit	sementti						120	1356	7337	0,385		4
												11300
Pystyöjitus (lamellipystyöjat+ ylipenger)	Rakennusaine	Kerros-paksuus	Pituus	Leveys	Tilavuus	Tilavuus	Massa	Massa	Ojien	Ojan	Kokonais- pituus	
		m	m	m	m ³ rtr	m ³ itd	rakent. t	kulj. t	kpl	m	m	
ojituserros	hiekk	0,5	1000	15,75	7875	12120	19770	17330				
painopenger (3 kk)	hiekk	2,5	1000	15,75	39375	60580	98830	86630				
pystyöjat	lamellipystyöjat								17000	5		85000
poisvietävä massa	hiekk	2,5	1000	15,75	39375	60580	98830	86630				

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden tuhkarakenteessa LT1

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							VOC	pöly	melu (7m)
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	kg	kg			
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dB(A)	
irrotus ja kuormaus	kaivinkone	105	5250	1421	26,25	73,5	6,83	5,25	3885	8,40	507	89		
kuljetus 50 km	kuorma-auto	899	154174	15295	214	524	56,8	7,43	40510	74,3	1579	84		
levitys	puskutraktori	102	4488	1373	22,44	67,3	5,83	4,49	3725	7,18	*	84		
tiivistys	kumipyöräajyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92		
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87		
Yhteensä		1117	164168	18160	264	669	69,8	17,4	48320	90,3				
Suodatinkerros Hiekka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	kg	kg	kg	dB(A)	
irrotus ja kuormaus	kaivinkone	39,4	1970	533	9,85	27,6	2,56	1,97	1458	3,15	190	89		
kuljetus 50 km	kuorma-auto	338	57859	5740	80	197	21,3	2,79	15203	27,9	592	84		
levitys	puskutraktori	38,1	1676	513	8,38	25,1	2,18	1,68	1391	2,68	*	84		
tiivistys	kumipyöräajyrä	8,3	112	33,0	0,56	1,68	0,15	0,11	89,6	0,18	*	92		
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87		
Yhteensä		426	61761	6860	100	253	26,4	6,7	18260	34,1				
Jakava krs LT + 2 % sem.	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	kg	kg	kg	dB(A)	
annostelu sekoittimeen	annostelija	54,5	382	-	*	1,5	0,22	1,5	895	*	*	*		
sekoitus	tasosekoitin	27,2	2448	-	*	9,4	1,39	9,5	5743	*	*	*		
kuormaus	sekoittimesta	87,6	2649	263	5,26	7,36	0,47	*	*	2,63	24,5	*		
kuljetus 10 km	kuorma-auto	202	32458	3220	77	98	11,9	1,54	8596	25,9	60,2	84		
levitys	puskutraktori	60,9	2680	820	13,40	40,2	3,48	2,68	2224	4,29	*	84		
tiivistys	kumipyöräajyrä	32,7	441	130	2,21	6,62	0,57	0,44	352,8	0,71	*	92		
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87		
sementin valmistus		-	364097	33072	466	907	95,6	154,4	191100	255	*	*		
sementin kuljetus	säiliöauto	27,2	4939	490	7	17	1,8	0,24	1298	2,4	12	84		
Yhteensä		495	410237	38036	571	1089	116	170	210324	291				
Päällyste 1+2 AB16 + bitumisora	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	kg	kg	kg	dB(A)	
Raaka-aineet			432390	1500	33,4	706	77,2	206	82774	487	*	*		
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		111460	9810	30,0	300	17,5	63	57375	19	*	*		
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		5758	571	13,1	16,8	1,8	0,27	1500	4,4	14,4	84		
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		1950	200	0,60	5,0	0,2	0,27	555	0,36	*	81		
Asfaltin tiivistys	ajyrä		1709	175	0,52	4,4	0,2	0,23	486	0,32	*	92		
BS:n valmistus	kuumamenetelmä		267500	23550	72,0	720	42,0	150	137700	45	*	*		
BS:n kuljetus	kuorma-auto		13713	1360	31,2	40,0	4,4	0,64	3572	10,4	34,4	84		
BS:n levitys	asfaltinlevitin		1560	160	0,48	4,0	0,2	0,21	444	0,29	*	81		
BS:n tiivistys	ajyrä		1367	140,0	0,42	3,5	0,1	0,19	388,8	0,25	*	92		
Yhteensä			837406	37466	182	1800	144	420	284795	566				

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden tuhkarakenteessa LT2

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais- työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	102	5100	1380	25,50	71,4	6,63	5,1	3774	8,16	489		89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	867	148529	14735	206	505	54,7	7,16	39027	71,6	1521		84
levitys	puskutraktori	98,3	4325	1323	21,63	64,9	5,62	4,33	3590	6,92	*		84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*		92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*		87
Yhteensä		1078	158210	17510	255	645	67,3	16,8	46600	87,0			
Suodatinkerros													
Hiekka													
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	36,6	1830	495	9,15	25,6	2,38	1,83	1354	2,93	176		89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	313	53626	5320	74	182	19,8	2,58	14090	25,8	549		84
levitys	puskutraktori	35,4	1558	477	7,79	23,4	2,03	1,56	1293	2,49	*		84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*		92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*		87
Yhteensä		396	57270	6370	93	235	24,5	6,2	16940	31,6			
Jakava krs													
LT + 2 % sem.													
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
annostelu sekoittimeen	annostelija	29,1	204	-	*	0,8	0,12	0,8	478	*	*		*
sekoitus	tasosekoitin	14,5	1305	-	*	5,0	0,74	5,1	3062	*	*		*
kuorma	sekoittimesta	46,7	1412	140	2,8	3,92	0,25	*		1,4	13		*
kuljetus 10 km	kuorma-auto	108	17342	1720	41	52	6,4	0,82	4593	13,8	32,2		84
levitys	puskutraktori	32,5	1430	437	7,15	21,5	1,86	1,43	1187	2,29	*		84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	32,7	441	130	2,205	6,615	0,573	0,441	352,8	0,706	*		92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*		87
sementin valmistus	-	-	194681	17683	248,9	485	51,1	82,5	102180	136	*		*
sementin kuljetus	säiliöauto	15,6	2822	280	4	10	1,0	0,14	742	1,4	28,8		84
Yhteensä		282	219781	20433	307	587	62,2	91,4	112709	156			
Kantava krs													
Murske (0-32 mm)													
		h	kWh	l (räjähteellä)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
louhinta/ poraus	poravaunu	15	525	180	2,10	6,30	0,525	0,525	420	0,84	4,84		100
louhinta/ panostus ja räjäytys	panostin/ räjähd	2,0	825	750	0,506	0,197	-	-	-	-	*		130
rikotus	hydraulivasara	6,82	510	150	2,04	7,14	0,51	0,51	408	0,714	*		90
louheen kuorma	kaivinkone	17,6	2150	616	10,75	32,3	2,80	2,15	1591	3,44	130		89
louheen ajo murskaamoon	maansiirtoauto	18,7	3330	1031	13,3	50,0	3,33	3,33	2464	4,00	*		91
murskaus	murskaamo	18,3	6770	2050	27,1	81,2	6,77	6,77	5822	10,83	5421		100
altakanto kasaan	hihnakuuljetin	14,4	1330	402	5,32	18,62	1,596	1,33	1192	1,86	0,76		84
kuorma	kaivinkone	18,6	930	252	4,65	13,02	1,209	0,93	688	1,49	130		89
kuljetus 10 km	kuorma-auto	67,6	7903	784	11	27	2,9	0,38	2076	3,8	20		84
levitys ja tasaus	tiehöylä	22,4	1344	395	5,38	20,16	1,75	1,34	1075	1,88	*		87
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*		84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16	0,27	0,81	0,070	0,054	43,2	0,086	*		92
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*		84
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,15	*		87
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16	0,27	0,81	0,070	0,054	43,2	0,086	*		92
Yhteensä		231	26789	6908	86,4	270	22,6	18,2	16481	30,4			
Päällyste 1+2													
AB20													
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
Raaka-aineet			441170	1400	33,3	724	80,8	211	84744	500	*		*
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		321000	28260	86,4	864	50,4	180	165240	54	*		*
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		16456	1632	37,4	48	5,28	0,77	4286	12,5	41,3		84
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		3510	360	1,1	9,0	0,4	0,48	999	0,65	*		81
Asfaltin tiivistys	jäyrä		3076	315	0,94	7,90	0,32	0,42	875	0,57	*		92
Yhteensä			785212	31967	159	1653	137,1	392,5	256144	568			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden tuhkarakenteessa LT3

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	102	5100	1380	25,50	71,4	6,63	5,1	3774	8,16	489	89	
kuljetus 50 km	kuorma-auto	867	148529	14735	206	505	54,7	7,16	39027	71,6	1521	84	
levitys	puskutraktori	98,3	4325	1323	21,63	64,9	5,62	4,33	3590	6,92	*	84	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92	
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87	
Yhteensä		1078	158210	17510	255	645	67,3	16,8	46600	87,0			
Suodatinkerros Hiekka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	36,6	1830	495	9,15	25,6	2,38	1,83	1354	2,93	176	89	
kuljetus 50 km	kuorma-auto	313	53626	5320	74	182	19,8	2,58	14090	25,8	549	84	
levitys	puskutraktori	35,4	1558	477	7,79	23,4	2,03	1,56	1293	2,49	*	84	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92	
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87	
Yhteensä		396	57270	6370	93	235	24,5	6,2	16940	31,6			
Jakava krs LT	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	dBa
annostelu sekoittimeen	annostelija	29,1	204	-	*	0,8	0,12	0,8	478	*	*	*	
sekoitus	tasosekoitin	14,5	1305	-	*	5,0	0,74	5,1	3062	*	*	*	
kuorma	sekoittimesta	46,7	1412	140	2,8	3,92	0,25	*	*	1,4	13,1	*	
kuljetus 10 km	kuorma-auto	108	17342	1720	41	52	6,4	0,82	4593	13,8	32,2	84	
levitys	puskutraktori	32,5	1430	437	7,15	21,5	1,86	1,43	1187	2,29	*	84	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	32,7	441	130	2,205	6,615	0,573	0,441	352,8	0,706	*	92	
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87	
Yhteensä		266	22278	2470	54	92	10,1	8,7	9787	18,4			
Kantava krs Murske (0-32 mm)	Työkone	Kokonais työaika/ h	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	dBa
louhinta/ poraus	poravaunu	15	525	180	2,10	6,30	0,525	0,525	420	0,84	4,84	100	
louhinta/ panostus ja räjäytys	panostin/ räjähd	2,0	825	750	0,506	0,197	-	-	-	-	*	130	
rikotus	hydraulivasara	6,82	510	150	2,04	7,14	0,51	0,51	408	0,714	*	90	
louheen kuorma	kaivinkone	17,6	2150	616	10,75	32,3	2,80	2,15	1591	3,44	130	89	
louheen ajo murskaamoon	maansiirtoauto	18,7	3330	1031	13,3	50,0	3,33	3,33	2464	4,00	*	91	
murskaus	murskaamo	18,3	6770	2050	27,1	81,2	6,77	6,77	5822	10,83	5421	100	
altakanto kasaan	hihnakuuljetin	14,4	1330	402	5,32	18,62	1,596	1,33	1192	1,862	0,76	84	
kuorma	kaivinkone	18,6	930	252	4,65	13,02	1,209	0,93	688	1,49	130	89	
kuljetus 10 km	kuorma-auto	67,6	7903	784	11	27	2,9	0,38	2076	3,8	20	84	
levitys ja tasaus	tiehöylä	22,4	1344	395	5,38	20,16	1,75	1,34	1075	1,88	*	87	
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*	84	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16	0,27	0,81	0,070	0,054	43,2	0,086	*	92	
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*	84	
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,151	*	87	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16	0,27	0,81	0,070	0,054	43,2	0,086	*	92	
Yhteensä		231	26789	6908	86,4	270	22,6	18,2	16481	30,4			
Päällyste 1+2 AB20	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	dBa
Raaka-aineet			441170	1400	33,3	724	80,8	211	84744	500	*	*	
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		321000	28260	86,4	864	50,4	180	165240	54	*	*	
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		16456	1632	37,4	48	5,28	0,77	4286	12,5	41,3	84	
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		3510	360	1,1	9,0	0,4	0,48	999	0,65	*	81	
Asfaltin tiivistys	jäyrä		3076	315	0,94	7,90	0,32	0,42	875	0,57	*	92	
Yhteensä			785212	31967	159	1653	137,1	392,5	256144	568			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden betonimurskerakenteessa BM1

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais- työaika h	Käytetty energia kWh	Polttoaineen kulutus l	Päästöt:			SO ₂ kg	CO ₂ kg	VOC kg	pöly kg	melu (7m) dBA
					CO kg	NO _x kg	Part. kg					
irrotus ja kuorma	kaivinkone	104	5200	1407	26,00	72,8	6,76	5,2	3848	8,32	499	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	885	151704	15050	211	516	55,9	7,31	39861	73,1	1554	84
levitys	puskutraktori	100	4400	1346	22	66,0	5,72	4,40	3652	7,04	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		1100	161560	17880	260	659	68,7	17,2	47570	88,8		
Suodatinkerros Hiekka	Työkone	Kokonais- työaika h	Käytetty energia kWh	Polttoaineen kulutus l	Päästöt:			SO₂ kg	CO₂ kg	VOC kg	pöly kg	melu (7m) dBA
					CO	NO _x	Part.					
irrotus ja kuorma	kaivinkone	103	5150	1394	25,75	72,1	6,70	5,15	3811	8,24	493	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	875	149940	14875	208	510	55,3	7,23	39398	72,3	1535	84
levitys	puskutraktori	99	4356	1332	21,78	65,3	5,66	4,36	3615	6,97	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		1088	159702	17680	257	651	67,9	17,0	47030	87,8		
Jakava krs Betonimurske (0-50)	Työkone	Kokonais- työaika h	Käytetty energia kWh	Polttoaineen kulutus l	Päästöt:			SO₂ kg	CO₂ kg	VOC kg	pöly kg	melu (7m) dBA
					CO	NO _x	Part.					
jätebetonin murskaus	murskain	97,6	7810	2440	31,2	93,7	7,81	7,81	6717	12,50	*	100
kuorma	pyöräkuormaaja	40	1400	412	7,00	21,0	2,10	1,4	1120	2,80	*	89
kuljetus 10 km	kuorma-auto	73,6	11314	1122	27	34	4,1	0,54	2996	9,0	21	84
levitys	tiehöylä	26	1560	459	6,24	23,4	2,03	1,56	1248	2,18	*	87
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*		0,115	*	84
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,151	*	87
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
Yhteensä		275	23517	4843	77	191	17,8	12,6	13131	28,7		
Kantava krs Betonimurske (0-50)	Työkone	Kokonais- työaika h	Käytetty energia kWh	Polttoaineen kulutus l	Päästöt:			SO₂ kg	CO₂ kg	VOC kg	pöly kg	melu (7m) dBA
					CO	NO _x	Part.					
jätebetonin murskaus	murskain	63,4	5070	1590	20,3	60,8	5,07	5,07	4360	8,11	*	100
kuorma	pyöräkuormaaja	20,1	704	207	3,52	10,6	1,06	0,704	563	1,41	*	89
kuljetus 10 km	kuorma-auto	47,7	7326	727	17	22	2,7	0,35	1940	5,8	14	84
levitys	tiehöylä	16,9	1014	298	4,06	15,21	1,32	1,01	811	1,42	*	87
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*		0,115	*	84
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,151	*	87
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
	kuorma-auto	24	726	72	1,296	1,915	0,115	*		0,691	*	84
Yhteensä		186	16273	3304	52	129	11,9	8,4	8724	19,6		
Päällyste 1+2 AB20	Työkone	Kokonais- työaika h	Käytetty energia kWh	Polttoaineen kulutus l	Päästöt:			SO₂ kg	CO₂ kg	VOC kg	pöly kg	melu (7m) dBA
					CO	NO _x	Part.					
Raaka-aineet			441170	1400	33,3	724	80,8	211	84744	500	*	*
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		321000	28260	86,4	864	50,4	180	165240	54	*	*
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		16456	1632	37,4	48	5,28	0,77	4286	12,5	41,3	84
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		3510	360	1,1	9,0	0,4	0,48	999	0,65	*	81
Asfaltin tiivistys	jäyrä		3076	315	0,94	7,90	0,32	0,42	875	0,57	*	92
Yhteensä			785212	31967	159	1653	137,1	392,5	256144	568		

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden betonimurskerakenteessa BM2

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:					VOC	pöly	melu (7m)
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2			
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuormaus	kaivinkone	104	5200	1407	26,00	72,8	6,76	5,2	3848	8,32	501	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	887	152057	15085	211	517	56,0	7,33	39954	73,3	1557	84
levitys	puskutraktori	101	4444	1359	22,22	66,7	5,78	4,44	3689	7,11	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		1103	161957	17930	261	661	68,9	17,2	47700	89,1		
Suodatinkerros												
Hiekka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:					VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuormaus	kaivinkone	84,2	4210	1139	21,05	58,9	5,47	4,21	3115	6,74	405	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	718	123127	12215	171	419	45,4	5,93	32352	59,3	1261	84
levitys	puskutraktori	81,4	3582	1096	17,91	53,7	4,66	3,58	2973	5,73	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		894	131175	14530	211	535	55,8	14,0	38650	72,2		
Jakava krs												
Betonimurske (0-50)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:					VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
jätebetonin murskaus	murskain	131	10510	3285	42,0	126,1	10,51	10,51	9039	16,82	*	100
kuormaus	pyöräkuormaaja	41,7	1460	429	7,30	21,9	2,19	1,46	1168	2,92	*	89
kuljetus 10 km	kuorma-auto	98,9	15209	1509	36	46	5,6	0,72	4028	12,1	28	84
levitys	tiehöylä	35	2100	618	8,40	31,5	2,73	2,10	1680	2,94	*	87
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*		0,115	*	84
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,151	*	87
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
Yhteensä		344	30712	6251	99	244	22,7	16,1	16964	37,0		
Kantava krs												
Betonimurske (0-50)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:					VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
jätebetonin murskaus	murskain	125	10030	3135	40,1	120,4	10,03	10,03	8626	16,05	*	100
kuormaus	pyöräkuormaaja	39,8	1393	410	6,97	20,9	2,09	1,393	1114	2,79	*	89
kuljetus 10 km	kuorma-auto	94,7	14560	1444	35	44	5,3	0,69	3856	11,6	27	84
levitys	tiehöylä	33,4	2004	589	8,02	30,06	2,61	2,00	1603	2,81	*	87
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*		0,115	*	84
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,151	*	87
tiivistys	täryjäyrä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92
jälkikastelu	kuorma-auto	24	726	72	1,296	1,915	0,115	*		0,691	*	84
Yhteensä		331	30146	6060	96	236	21,9	15,4	16249	36,1		
Päällyste 1+2												
AB20	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:					VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
Raaka-aineet			245090	780	18,5	402	44,9	117,2	47080	278	*	*
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		178330	15700	48	480	28	100	91800	30	*	*
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		9186	911	20,9	26,8	2,9	0,43	2393	7,0	23,0	84
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		3510	360	1,1	9	0,4	0	999	1	*	81
Asfaltin tiivistys	jäyrä		3076	315	0,9	7,9	0,3	0,4	875	0,6	*	92
Yhteensä			439191	18066	89	926	76,5	218	143147	316		

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden masuunikuonarakenteessa MK

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuormaus	kaivinkone	98,7	4935	1335	24,68	69,1	6,42	4,935	3652	7,90	475	89	
kuljetus 50 km	kuorma-auto	842	144295	14315	200	491	53,2	6,95	37914	69,5	1478	84	
levitys	puskutraktori	95,4	4198	1284	20,99	63,0	5,46	4,20	3484	6,72	*	84	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92	
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87	
Yhteensä		1047	153684	17010	247	627	65,4	16,3	45260	84,5			
Suod. ja jakava kerros Masuunihiekka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
kuormaus	pyörakuormaaja	35,6	1869	528	9,35	28,0	2,80	1,869	1495	3,74	*	89	
kuljetus 50 km	kuorma-auto	496	85025	8435	118	289	31,3	4,10	22341	41,0	871	84	
levitys ja tasaus	pyörakuormaaja	35,6	1869	528	9,35	28,0	2,80	1,87	1495	3,74	*	89	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92	
Yhteensä		576	88875	9520	137	347	37,1	7,9	25420	48,6			
Kantava krs Masuunikuonamurske	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
irrotus ja syöttö	pyörakuormaaja	3,9	205	58	1,03	3,1	0,31	0,205	164	0,41	*	89	
kuonan murskaus	murskaamo	21,6	5170	1617	20,7	62,0	5,17	5,17	4446	8,27	*	100	
kuormaus	pyörakuormaaja	3,9	205	58	1,03	3,1	0,31	0,205	164	0,41	*	89	
kuljetus 50 km	kuorma-auto	117	20110	1995	28	68	7,4	0,97	5284	9,7	206	84	
levitys	tiehöylä	12,3	738	217	2,95	11,07	0,96	0,74	590	1,03	*	87	
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*	84	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16,0	0,270	0,810	0,070	0,054	43,2	0,086	*	92	
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,15	*	87	
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16,0	0,270	0,810	0,070	0,054	43,2	0,086	*	92	
Yhteensä		184	27479	4231	58	162	15,4	8,2	11393	21,3			
Päällyste 1+2 AB20	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
		h	kWh	l	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly	kg	
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
Raaka-aineet			441170	1400	33,3	724	80,8	211	84744	500	*	*	
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		321000	28260	86,4	864	50,4	180	165240	54	*	*	
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		16456	1632	37,4	48	5,28	0,77	4286	12,5	41,3	84	
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		3510	360	1,1	9,0	0,4	0,48	999	0,65	*	81	
Asfaltin tiivistys	jyrä		3076	315	0,94	7,90	0,32	0,42	875	0,57	*	92	
Yhteensä			785212	31967	159	1653	137,1	392,5	256144	568			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tiekilometriä kohden vertailurakenteessa V1

Penger Hiekka (hl.)	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:			SO2	CO2	VOC	pöly	melu (7m)
					CO	NOx	Part.					
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	104	5200	1407	26,00	72,8	6,76	5,2	3848	8,32	499	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	886	151704	15050	211	516	55,9	7,31	39861	73,1	1554	84
levitys	puskutraktori	100	4400	1346	22	66,0	5,72	4,40	3652	7,04	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		1101	161560	17880	260	659	68,7	17,2	47570	88,8		
Suodatinkerros Hiekka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:			SO2	CO2	VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	57,4	2870	777	14,35	40,2	3,73	2,87	2124	4,59	276	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	490	83966	8330	117	286	30,9	4,05	22063	40,5	860	84
levitys	puskutraktori	55,5	2442	747	12,21	36,6	3,17	2,44	2027	3,91	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	8,3	112	33,0	0,560	1,680	0,146	0,112	89,6	0,179	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42,0	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		614	89534	9930	144	366	38,2	9,6	26420	49,3		
Jakava krs Sora	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:			SO2	CO2	VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
irrotus ja kuorma	kaivinkone	48,4	2420	655	12,10	33,9	3,15	2,42	1791	3,87	244	89
kuljetus 50 km	kuorma-auto	435	74441	7385	103	253	27,4	3,59	19560	35,9	762	84
levitys	puskutraktori	40,2	1769	541	8,845	26,5	2,30	1,77	1468	2,83	*	84
tiivistys	täryjäyrä	8	196	62	0,78	2,4	0,24	0,20	157	0,35	*	92
tasaus	tiehöylä	2,4	144	42	0,576	2,16	0,187	0,144	115,2	0,202	*	87
Yhteensä		534	78970	8685	126	318	33,3	8,1	23091	43,1		
Kantava krs Murske (0-32 mm)	Työkone	Kokonais työaika/ h	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:			SO2	CO2	VOC	pöly	melu (7m)
			kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
louhinta/ poraus	poravaunu	25,3	886	303	3,54	10,63	0,886	0,886	709	1,42	8,18	100
louhinta/ panostus ja räjäytys	panostin/ räjähde	3,4	1390	1270	0,856	0,333	-	-	-	-	*	130
rikotus	hydraulivasara	11,5	860	253	3,44	12,04	0,86	0,86	688	1,204	*	90
louheen kuorma	kaivinkone	29,7	3630	1040	18,15	54,5	4,72	3,63	2686	5,81	220	92
louheen ajo murskaamoon	maansiirta-auto	31,5	5620	1730	22,5	84,3	5,62	5,62	4159	6,74	*	91
murskaus	murskaamo	30,9	11400	3460	45,6	136,8	11,4	11,4	9804	18,24	9160	100
altakanto kasaan	hihnakuuljetin	24,3	2240	679	8,96	31,36	2,688	2,24	2007	3,136	1,29	84
kuorma	kaivinkone	31,4	1570	425	7,85	21,98	2,041	1,57	1162	2,51	220	89
kuljetus 10 km	kuorma-auto	391	13406	1330	19	46	4,9	0,65	3523	6,5	34	84
levitys ja tasaus	tiehöylä	37,8	2268	667	9,07	34,02	2,95	2,27	1814	3,18	*	87
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*	84
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16	0,27	0,81	0,070	0,054	43,2	0,086	*	92
kastelu	kuorma-auto	4	121	12	0,216	0,319	0,019	*	*	0,115	*	84
muotoilu	tiehöylä	13,7	822	242	3,29	12,3	1,069	0,822	658	1,151	*	87
tiivistys	kumipyöräjäyrä	4	54	16	0,27	0,81	0,070	0,054	43,2	0,086	*	92
Yhteensä		647	44442	11455	143	446	37,3	30,1	27296	50,3		
Päällyste 1+2 AB20	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:			SO2	CO2	VOC	pöly	melu (7m)
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
Raaka-aineet			441170	1400	33,3	724	80,8	211	84744	500	*	*
Asfaltin valmistus	kuumamenetelmä		321000	28260	86,4	864	50,4	180	165240	54	*	*
Asfaltin kuljetus	kuorma-auto		16456	1632	37,4	48	5,28	0,77	4286	12,5	41,3	84
Asfaltin levitys	asfaltinlevitin		3510	360	1,1	9,0	0,4	0,48	999	0,65	*	81
Asfaltin tiivistys	jäyrä		3076	315	0,94	7,90	0,32	0,42	875	0,57	*	92
Yhteensä			785212	31967	159	1653	137,1	392,5	256144	568		

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tuhkan läjityksessä LT1L

Louhenger Louhe	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
louhinta/ poraus	poravaunu	32,7	1143	392	4,57	13,72	1,143	1,143	914	1,83	6,49	100	
louhinta/ panostus ja räjäytys	panostin/ räjähde	4,4	1796	1633	1,101	0,428	-	-	-	-	*	130	
rikotus	hydraulivasara	14,8	1110	326	4,44	15,54	1,11	1,11	888	1,55	*	90	
louheen kuorma	kaivinkone	52,2	2871	660	14,36	43,1	3,73	2,87	2125	4,59	314	92	
louheen kuljetus 10 km	kuorma-auto	188	25131	2493	60	76	9,2	1,19	6656	20,1	48,5	84	
louheen levitys	puskutraktori	66,8	4008	1179	20,04	60,1	5,21	4,01	3327	6,41	*	84	
Yhteensä		359	36059	6683	104,1	208,7	20,41	10,32	13909	34,44			

Täyttöallas Lentotuhka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
annostelu sekoittimeen	annostelija	53,4	374	-	*	1,4	0,21	1,5	877	*	*	*	
tuhkamassan sekoitus	tasosekoitin	26,7	2403	-	*	9,3	1,37	9,3	5637	*	*	*	
kuorma	sekoittimesta	85,8	2595	257	4,63	6,85	0,41	*	*	2,47	24,0	*	
kuljetus 10 km	kuorma-auto	198	31808	3156	75	96	11,7	1,51	8424	25,4	59,0	84	
levitys ja tiivistys	kumipyöräjäyrä	100	1350	413	6,75	20,3	1,76	1,35	1080	2,16	*	92	
Yhteensä		464	38530	3826	86,8	134	15,4	13,7	16018	30,0			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt tuhkan läjityksessä LT2L

Louhenger Louhe	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
louhinta/ poraus	poravaunu	17,4	610	209	2,44	7,32	0,61	0,61	488	0,98	3,46	100	
louhinta/ panostus ja räjäytys	panostin/ räjähde	2,3	958	871	0,587	0,228	-	-	-	-	*	130	
rikotus	hydraulivasara	7,9	592	174	2,37	8,29	0,592	0,592	474	0,829	*	90	
louheen kuorma	kaivinkone	27,9	1535	353	7,68	23,0	2,00	1,54	1136	2,46	167	92	
louheen kuljetus 10 km	kuorma-auto	101	13447	1334	32	41	4,9	0,64	3561	10,7	25,9	84	
louheen levitys	puskutraktori	35,6	2136	628	10,68	32,0	2,78	2,14	1773	3,42	*	84	
Yhteensä		192	19278	3569	55,7	111,5	10,90	5,51	7432	18,41			

Täyttöallas Lentotuhka	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
annostelu sekoittimeen	annostelija	28,5	200	-	*	0,8	0,11	0,8	468	*	*	*	
tuhkamassan sekoitus	tasosekoitin	14,2	1278	-	*	4,9	0,73	5,0	2998	*	*	*	
kuorma	sekoittimesta	45,8	1385	137	2,47	3,65	0,22	*	*	1,32	12,8	*	
kuljetus 10 km	kuorma-auto	106	16971	1684	40	51	6,2	0,81	4494	13,5	31,5	84	
levitys ja tiivistys	kumipyöräjäyrä	53,4	721	221	3,61	10,8	0,94	0,72	577	1,15	*	92	
Yhteensä		248	20554	2042	46,3	71	8,2	7,3	8537	16,0			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt betonijätteen läjityksessä BM1L

Läjitys Betonijäte	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
betonijätteen kuorma	kaivinkone	35	1925	443	9,63	28,9	2,50	1,93	1425	3,08	*	92	
betonijätteen kuljetus 10 km	kuorma-auto	139	18640	1849	44	56	6,8	0,88	4937	14,9	34,6	84	
betonijätteen levitys	puskutraktori	36,6	2196	646	10,98	32,9	2,85	2,20	1823	3,51	*	84	
Yhteensä		211	22761	2938	64,8	118,1	12,19	5,01	8184	21,47			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt betonijätteen läjityksessä BM2L

Läjitys Betonijäte	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBa
betonijätteen kuorma	kaivinkone	55,8	3069	706	15,35	46,0	3,99	3,07	2271	4,91	*	92	
betonijätteen kuljetus 10 km	kuorma-auto	223	29768	2953	71	90	10,9	1,41	7884	23,8	55,2	84	
betonijätteen levitys	puskutraktori	58,4	3504	1031	17,52	52,6	4,56	3,50	2908	5,61	*	84	
Yhteensä		337	36341	4690	103,5	188,5	19,46	7,99	13063	34,27			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt massastabiloinnissa

Massastabilointi	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
sementin valmistus		*	12631944	1147383	16150	31450	3315	5355	6630000	8840	*	*	
sementin kuljetus 100 km	säiliöauto	829	150293	14910	209	511	55,4	7,24	39490	72,4	1536	84	
stabilointi	sekoituslaite	1890	103950	23909	520	1559	135	104	76923	166	*	95	
tiivistys	täryjyvä	11,3	277	88	1,11	3,3	0,33	0,28	222	0,50	*	92	
Yhteensä		2730	12886464	1186290	16880	33524	3506	5466	6746635	9079			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt massanvaihdossa

Massanvaihto	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
saven irrotus ja kuormaus	kaivinkone	1190	59500	16100	298	833	77,4	59,5	44030	95,2	*	89	
saven kuljetus 10 km	kuorma-auto	3390	501702	49772	1190	1515	184	23,8	132870	400	931	84	
saven levitys	puskutraktori	1204	52976	16204	265	795	68,9	53,0	43970	84,8	*	84	
HkMr irrotus ja kuormaus	kaivinkone	1100	55000	14882	275	770	71,5	55	40700	88,0	*	89	
HkMr kuljetus 10 km	kuorma-auto	3073	454777	45116,8	1079	1373	167	21,6	120442	363	843	84	
HkMr levitys	puskutraktori	899	39556	12099	198	593	51,4	39,6	32831	63,3	*	84	
tiivistys	täryjyvä	106	2597	825	10,4	31,2	3,12	2,60	2078	4,67	*	92	
Yhteensä		10962	1166108	155000	3315	5910	622,9	255,0	416920	1099,2			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt syvästabiloinnissa

Syvästabilointi	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
sementin valmistus		*	4244333	385521	5426	10567	1114	1799	2227680	2970	*	*	
sementin kuljetus 100 km	säiliöauto	335	60682	6020	84	206	22,4	2,92	15944	29,2	620	84	
pilareiden teko	stabilointilaitte	587	82990	8511	332	1162	83,0	83,0	66392	116,2	*	*	
sementin levitys	traktori+levitin	50	688	202	2,8	10,3	1,03	0,69	537	1,03	*	*	
sekoitus	traktori+hyrsin	50	688	1012	2,8	10,3	1,03	0,69	537	1,03	*	*	
tiivistys	täryjyvä	10	245	78	0,98	2,9	0,29	0,25	196	0,44	*	92	
Yhteensä			4389626	401344	5849	11959	1222	1887	2311286	3118			

Työkoneiden käyttöajat ja päästöt pystyjoituksessa

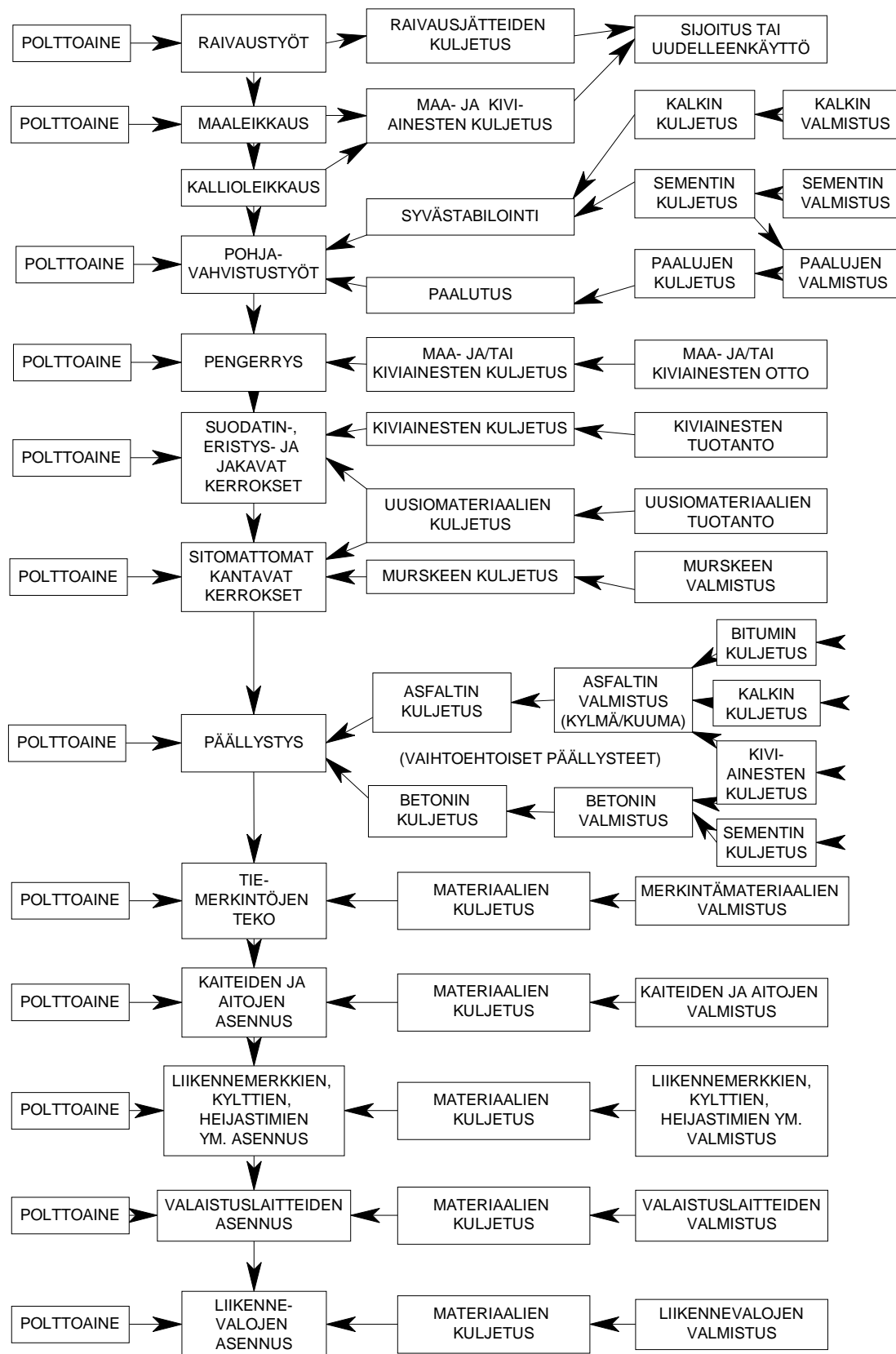
Pystyjoitus	Työkone	Kokonais työaika	Käytetty energia	Polttoaineen kulutus	Päästöt:							melu (7m)	
					CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC	pöly		
		h	kWh	l (räjähteellä kg)	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	dBA
hiekan irrotus ja kuormaus	kaivinkone	627	31350	8483	157	439	40,8	31,4	23199	50,2	2284	89	
kuljetus 50 km	kuorma-auto	5343	915869	90860	1272	3115	337,5	44,13	240649	441	9379	84	
levitys(ojituskerros ja painop.)	puskutraktori	605	26620	8143	133	399	34,6	26,6	22095	42,6	*	84	
tiivistys (ojituskerros)	kumipyöräjäyvä	10,9	147	43,0	0,735	2,21	0,191	0,147	118	0,235	*	92	
painopenkereen kuormaus	pyöräkuormaaja	577	20195	5940	101	303	30,3	20,2	16156	40,4	2284	89	
polypropeenin valmistus			51442	3988	4,0	57,8	11,6	63,6	6358	75,1			
pystyjanauhojen valmistus	tehdas	56,7	5865	-	22,6	3,34	22,8	-	13759	-	*	*	
pystyjanauhojen kuljetus	rekka	2,2	201	20	0,28	0,68	0,07	0,01	53	0,10	4	84	
pystyjanauhojen kuljetus	laiva	72	544	50	0,544	7,62	0,163	-	337	0,022	*	*	
pystyjanauhojen kuljetus	rekka	4,2	402	40	0,56	1,37	0,15	0,02	106	0,19	7	84	
pystyjoien teko	asennuskone	85	12750	3750	51,0	191	16,6	12,8	10200	17,9	*	87	
Yhteensä		7383	1065385	121320	1720	4540	475	222	333030	668			

Tuhkarakenne LT1	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	264	669	69,8	17,4	48320	90,3	18160	164168
Suodatin	100	253	26,4	6,7	18260	34,1	6860	61761
Jakava	571	1089	115,6	170,4	210324	291	38036	410237
Päälyste	182	1800	143,6	419,9	284795	566	37466	837406
Yht.	1116	3811	355	614	561699	982	100522	1473573
Tuhkarakenne LT2	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	255	645	67,3	16,8	46600	87,0	17510	158210
Suodatin	92,6	235	24,5	6,2	16940	31,6	6370	57270
Jakava	307	587	62,2	91,4	112709	156	20433	219781
Kantava	86,4	270	22,6	18,2	16481	30,4	6908	26789
Päälyste	159	1653	137	393	256144	568	31967	785212
Yht.	899	3391	314	525	448873	873	83188	1247261
Tuhkarakenne LT3	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	255	645	67,3	16,8	46600	87,0	17510	158210
Suodatin	92,6	235	24,5	6,23	16940	31,6	6370	57270
Jakava	53,9	92,3	10,1	8,7	9787	18,4	2470	22278
Kantava	86,4	270	22,6	18,2	16481	30,4	6908	26789
Päälyste	159	1653	137	393	256144	568	31967	785212
Yht.	646	2896	262	443	345952	735	65225	1049758
BM-rakenne BM1	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	260	659	68,7	17,2	47570	88,8	17880	161560
Suodatin	257	651	67,9	17,0	47030	87,8	17680	159702
Jakava	76,8	191	17,8	12,6	13131	28,7	4843	23517
Kantava	52,0	129	11,9	8,4	8724	19,6	3304	16273
Päälyste	159	1653	137	393	256144	568	31967	785212
Yht.	805	3283	303	448	372599	792	75674	1146263
BM-rakenne BM2	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	261	661	68,9	17,2	47700	89,1	17930	161957
Suodatin	211	535	55,8	14,0	38650	72,2	14530	131175
Jakava	99,3	244	22,7	16,1	16964	37,0	6251	30712
Kantava	96,4	236	21,9	15,4	16249	36,1	6060	30146
Päälyste	89,4	926	76	218	143147	316	18066	439191
Yht.	757	2602	246	281	262710	550	62837	793181
MK-rakenne MK	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	247	627	65,4	16,3	45260	84,5	17010	153684
Suodatin+jakava	137	347	37,1	7,9	25420	48,6	9520	88875
Kantava	57,7	162	15,4	8,2	11393	21,3	4231	27479
Päälyste	159	1653	137	393	256144	568	31967	785212
Yht.	601	2789	255	425	338216	722	62728	1055250
Vertailurakenne	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Penger	260	659	68,7	17,2	47570	88,8	17880	161560
Suodatin	144	366	38,2	9,6	26420	49,3	9930	89534
Jakava	126	318	33,3	8,1	23091	43,1	8685	78970
Kantava	143	446	37,3	30,1	27296	50,3	11455	44442
Päälyste	159	1653	137	393	256144	568	31967	785212
Yht.	832	3442	315	457	380520	799	79917	1159718
Tuhkan läiitys LT1L	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Täyttö	104	209	20,4	10,3	13909	34,4	6683	36059
Louhepenger	86,8	134	15,4	13,7	16018	30,0	3826	38530
Yht.	191	343	35,8	24,0	29928	64	10509	74589
Tuhkan läiitys LT2L	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Täyttö	55,7	112	10,9	5,5	7432	18,4	3569	19278
Louhepenger	46,3	71	8,2	7,3	8537	16,0	2042	20554
Yht.	102	183	19,1	12,8	15969	34,4	5611	39832
BM läiitys	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
BM1L	64,8	118	12,2	5,0	8184	21,5	2938	22761
BM2L	103	188	19,5	8,0	13063	34,3	4690	36341
Pohiavahvistus- menetelmät	CO kg/km	NOx kg/km	Part. kg/km	SO2 kg/km	CO2 kg/km	VOC kg/km	Polttoaine l/km	Energia kWh/km
Massastabilointi	16880	33524	3506	5466	6746635	9079	1186290	12886464
Massanvaihto	3315	5910	623	255	416920	1099	155000	1166108
Syvästabilointi	5849	11959	1222	1887	2311286	3118	401344	4389626
Pystyjoitus	1720	4540	475	222	333030	668	121320	1065385

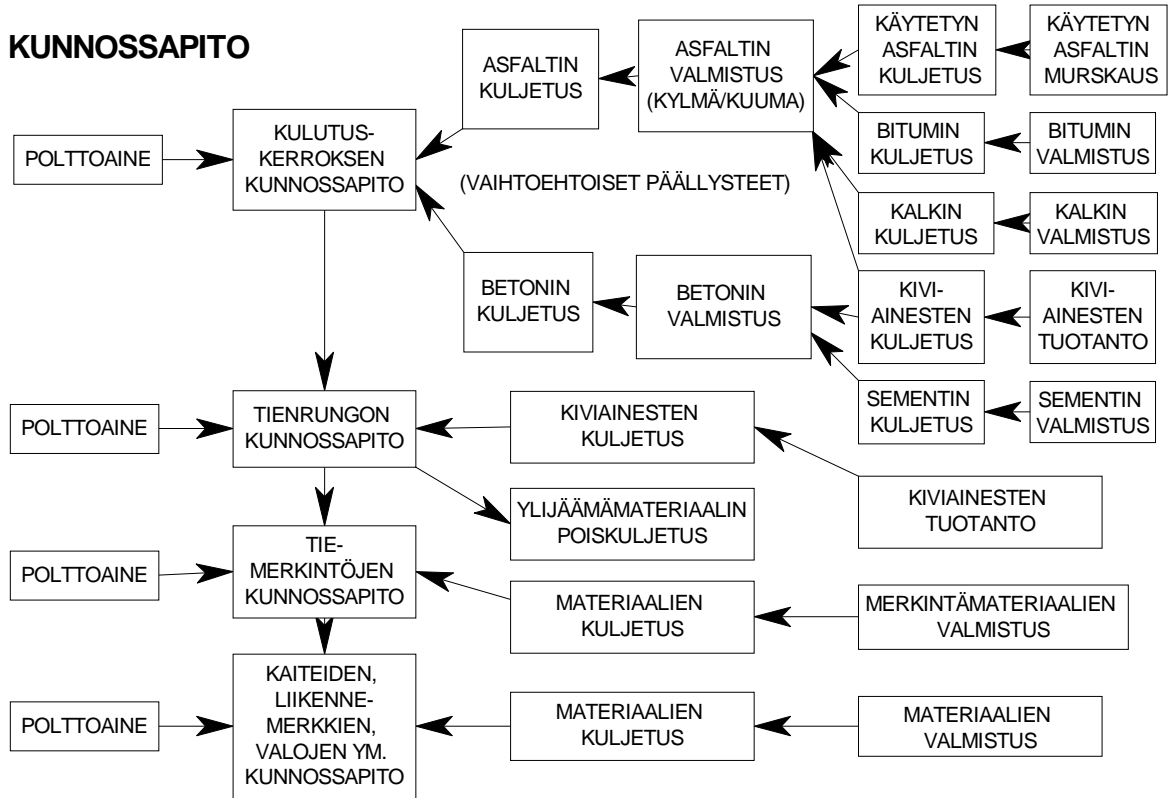
Työkoneiden käyttöajat, energian- ja polttoaineen kulutukset sekä päästöt eri työvaiheissa

	Tehty työ	Kokonais	Käytetty	Polttoaineen	Päästöt:					
		työaika	energia	kulutus	CO	NOx	Part.	SO2	CO2	VOC
		h/km	kWh/km	l/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km	kg/km
Tuhkarakenne 1	Esikäsitteily ja kuormaus	314	1188146	70148	642	2752	244	591	480930	819
	Kuljetukset	1466	268901	26676	423	893	98	13	70679	145
	Sijoitus	258	16527	3703	51	166	14	11	10092	17
	Yht.	2037	1473573	100527	1116	3811	355	614	561700	982
Tuhkarakenne2	Esikäsitteily ja kuormaus	340	783072	54789	472	2388	209	502	273417	726
	Kuljetukset	1371	246678	24471	374	825	90	12	64813	129
	Sijoitus	275	17512	3927	53	178	15	12	10640	18
	Yht.	1986	1247261	83188	899	3391	314	525	448871	873
Tuhkarakenne3	Esikäsitteily ja kuormaus	340	783072	54789	472	2388	209	502	273417	726
	Kuljetukset	1356	243856	24191	370	815	89	12	64072	128
	Sijoitus	275	17512	3927	53	178	15	12	10640	18
	Yht.	1971	1049758	65225	646	2896	262	443	345949	735
Betonimurske- rakenne 1	Esikäsitteily ja kuormaus	428	787504	37110	233	1919	161	416	270403	595
	Kuljetukset	1881	336740	33406	501	1130	123	16	88481	173
	Sijoitus	363	22020	5152	71	234	20	15	13709	25
	Yht.	2672	1146263	75668	805	3283	303	448	372593	792
Betonimurske- rakenne 2	Esikäsitteily ja kuormaus	526	456223	26285	210	1303	110	250	165790	361
	Kuljetukset	1799	314138	31164	474	1053	115	15	82583	163
	Sijoitus	372	22820	5379	73	246	21	16	14327	26
	Yht.	2696	793181	62828	757	2602	246	281	262700	550
Masuunikuona- rakenne	Esikäsitteily ja kuormaus	164	774554	33256	176	1754	146	403	259905	575
	Kuljetukset	1455	265886	26377	384	896	97	13	69825	133
	Sijoitus	188	14810	3098	41	139	12	9,0	8482	15
	Yht.	1807	1055250	62731	601	2789	255	425	338212	722
Vertailurakenne	Esikäsitteily ja kuormaus	398	800256	41659	283	2087	173	428	278961	610
	Kuljetukset	2202	339973	33727	487	1148	124	16	89292	168
	Sijoitus	295	19489	4528	62	207	17	14	12261	21
	Yht.	2895	1159718	79914	832	3442	315	457	380514	799
Tuhkan läjitys 1	Esikäsitteily ja kuormaus	270	12291	3268	29	90	8,0	16	10441	10
	Kuljetukset	386	56940	5649	135	172	20,9	2,7	15080	45
	Sijoitus	167	5358	1592	27	80	7,0	5,4	4407	8,6
	Yht.	823	74589	10509	191	343	35,8	24,0	29928	64
Tuhkan läjitys 2	Esikäsitteily ja kuormaus	144	6557	1744	16	48	4,3	8,5	5564	5,6
	Kuljetukset	207	30417	3018	72	92	11	1,4	8056	24
	Sijoitus	89	2857	849	14	43	3,7	2,9	2350	4,6
	Yht.	440	39832	5611	102	183	19,1	12,8	15969	34,4
Betonimurskeen läjitys 1	Esikäsitteily ja kuormaus	35	1925	443	10	29	2,5	1,9	1425	3,1
	Kuljetukset	139	18640	1849	44	56	6,8	0,9	4937	15
	Sijoitus	37	2196	646	11	33	2,9	2,2	1823	3,5
	Yht.	211	22761	2938	65	118	12	5	8184	21
Betonimurskeen läjitys 2	Esikäsitteily ja kuormaus	56	3069	706	15	46	4	3	2271	5
	Kuljetukset	223	29768	2953	71	90	11	1	7884	24
	Sijoitus	58	3504	1031	18	53	5	4	2908	6
	Yht.	337	36341	4690	103	188	19	8	13063	34
Massastabilointi	Esikäsitteily ja kuormaus	*	12631944	1147383	16150	31450	3315	5355	6630000	8840
	Kuljetukset	829	150293	14910	209	511	55	7,2	39490	72
	Sijoitus	1901	104227	23997	521	1563	135	104	77145	167
	Yht.	2730	12886464	1186290	16880	33524	3506	5466	6746635	9079
Massanvaihto	Esikäsitteily ja kuormaus	2290	114500	30982	573	1603	149	115	84730	183
	Kuljetukset	6463	956479	94889	2269	2888	351	45	253312	763
	Sijoitus	2209	95129	29128	473	1419	123	95	78879	153
	Yht.	10962	1166108	154999	3315	5910	623	255	416921	1099
Syvästabilointi	Esikäsitteily ja kuormaus	*	4244333	385521	5426	10567	1114	1799	2227680	2970
	Kuljetukset	335	60682	6020	84	206	22	2,9	15944	29
	Sijoitus	697	84611	9803	338	1185	85	85	67661	119
	Yht.	1032	4389626	401344	5849	11959	1222	1887	2311286	3118
Pystyjoitus	Esikäsitteily ja kuormaus	1261	108852	18411	262	822	86	138	59472	166
	Kuljetukset	5421	917016	90970	1273	3125	338	44	241145	442
	Sijoitus	701	39517	11936	185	593	51	40	32412	61
	Yht.	7383	1065385	121317	1720	4540	475	222	333030	668

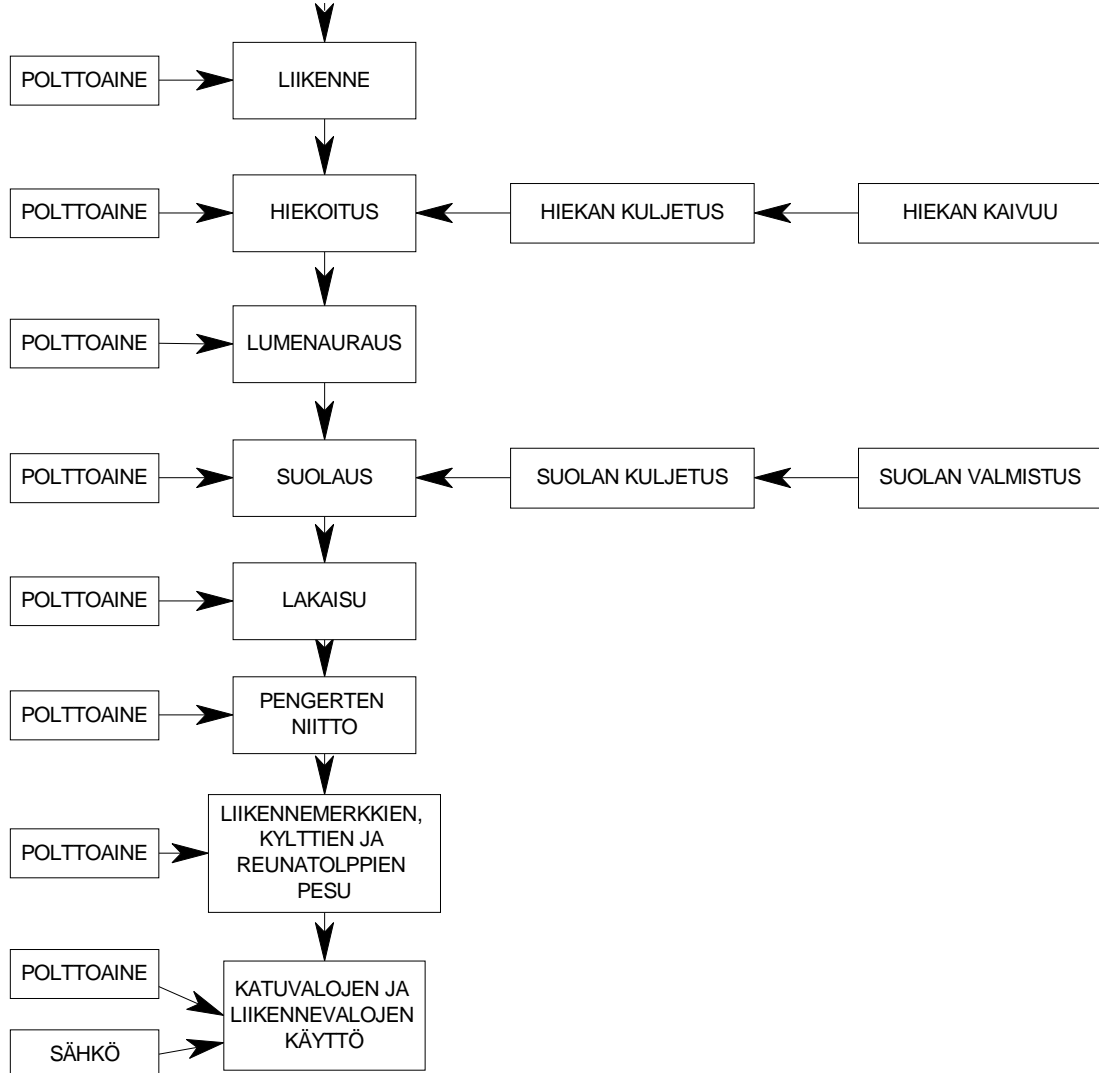
TIENRAKENNUS



KUNNOSSAPITO



KÄYTTÖ



PURKU JA UDELLEENKÄYTTÖ

