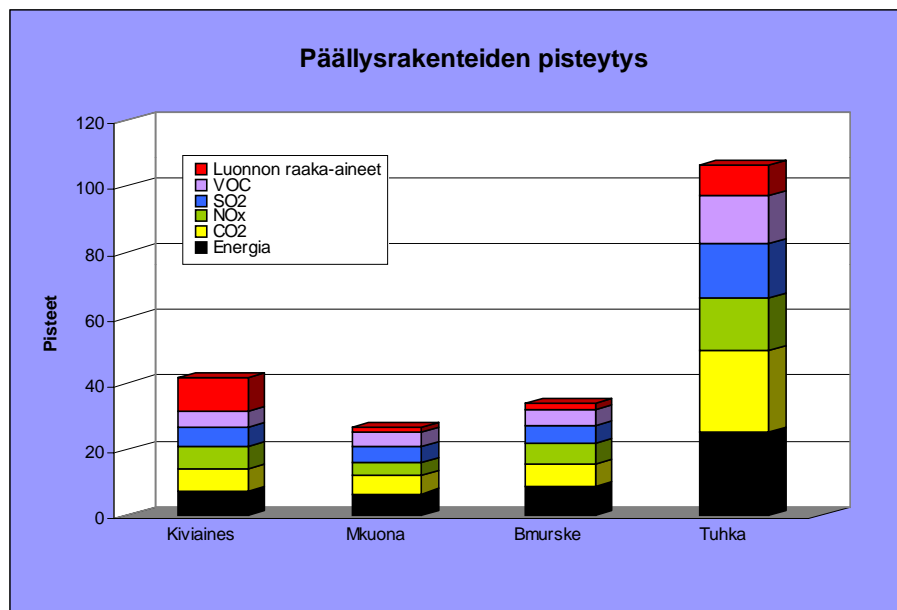


Jutta Laine-Ylijoki, Ulla-Maija Mroueh, Kari Wellman &
Esa Mäkelä

Maarakentamisen elinkaariarviointi

Ympäristövaikutusten laskentaohjelma



Maarakentamisen elinkaariarviointi Ympäristövaikutusten laskenta- ohjelma

Jutta Laine-Ylijoki, Ulla-Maija Mroueh, Kari Wellman &
Esa Mäkelä

VTT Kemiantekniikka



ISBN 951-38-5636-4 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5637-2 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

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

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

Laine-Ylijoki, Jutta, Mroueh, Ulla-Maija, Wellman, Kari & Mäkelä, Esa. Maarakentamisen elinkaariarviointi. Ympäristövaikutusten laskentaohjelma [Life cycle analysis of road construction. Inventory analysis program of environmental impacts]. Espoo 2000. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2014. 43 s. + liitt. 12 s.

Avainsanat road construction, life cycle analysis, modelling, calculation, environmental impacts, byproducts, transportation, emissions, energy, fuels

Tiivistelmä

Tämän "*Maarakentamisen elinkaariarviointi*" –tutkimuksen toisen vaiheen tavoitteena oli siirtää ensimmäisessä vaiheessa esitetty suositus käytännössä hyödynnettäväksi malliksi ja luoda laskentaohjelma tavallisimpien tierakenteiden elinkaarenaikaisten ympäristövaikutusten laskemiseksi ja vertailemiseksi. Lisäksi täydennettiin ensimmäisessä vaiheessa hankittuja tietoja esimerkiksi luonnonmateriaalien liukoisuuksista sekä maan käytön arvioinnista.

Tutkimuksessa luotu Excel-pohjainen laskentaohjelma soveltuu erilaisten maarakentamisessa käytettävien päälly- ja pohjarakenteiden ympäristökuormitusten rutiininomaiseen laskentaan, kun maarakenteiden elinkaariarviointi toteutetaan julkaisussa "*Maarakentamisen elinkaariarviointi*" /Eskola *et al.* 1999/ esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Lähtökohtana on suunnittelijan määrittelemä tierakenne tai osa rakenteesta, johon tarvittavat materiaalit ja rakenneosien paksuudet on määritetty. Lisäksi tulee tuntea työmaalle tuotavien ja sieltä muualle kuljetettävien materiaalien kuljetusmatkat ja –tavat, materiaalin liukoisuustiedot sekä sivutuotteiden kuljetusmatkat läjitysalueelle.

Laskentaohjelma sisältää yleisimmät maarakentamisen materiaalit ja rakenteet. Sitä voidaan tarvittaessa myös laajentaa uusilla materiaaleilla, rakenneosilla tai rakennevaihtoehdoilla. Lisäksi ohjelmaa on laajennettu eri tien päällysrakenteiden vertailua varten erillisellä vertailun mahdollistavalla laskentataulukolla. Vertailuohjelmassa rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksia voidaan vertailla sellaisenaan, suhteutettuina tai pisteytettyinä. Ohjelma sisältää useita valmiita graafisia malliesityksiä.

Eri materiaalien vertailtavuuden parantamiseksi ja koko rakenteen maaperään kohdistuvien haittojen arvioimiseksi selvitettiin myös muutamien, tierakenteissa yleisten luonnonmateriaalien sekä sivutuotteista masuunihiekan liukoisuutta. Saatuja liukoisuustuloksia hyödynnettiin ympäristökuormituslaskentamenettelyn liukoisuusarvioinnin tietoaineiston täydentämisessä.

Julkaisussa käsitellään myös maan käytön arviointimenetelmien nykytilannetta sekä olemassa olevaa kirjallisuutta. Mahdollisina arviointimenetelminä esitetään pisteytykseen tai materiaalikohtaisen maankäyttöpinta-alan tarkasteluun perustuvat menettelyt.

Laine-Ylijoki, Jutta, Mroueh, Ulla-Maija, Wellman, Kari & Mäkelä, Esa. Maarakentamisen elinkaariarviointi. Ympäristövaikutusten laskentaohjelma [Life cycle analysis of road construction. Inventory analysis program of environmental impacts]. Espoo 2000. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2014. 43 p. + app. 12 p.

Keywords road construction, life cycle analysis, modelling, calculation, environmental impacts, byproducts, transportation, emissions, energy, fuels

Abstract

A two-stage study "Life Cycle Analysis of Road Construction" is part of a more extensive research project "Demonstration of the Usability of Recycled Fill". In the first stage a proposal was made for a procedure suitable for the life cycle impact assessment of road construction. In order to evaluate the applicability of the procedure, the use of coal ash, crushed concrete waste and blast-furnace slag in road construction was evaluated in case studies. Also the use of these industrial by-products and waste materials was compared with the use of natural materials in corresponding applications. The aim of this study's second stage was to transfer the assembled data for utilisation as a practical model by creating an inventory analysis program to calculate and compare the life cycle impacts of the most common pavement and sub-grade constructions. Furthermore, the data concerning, especially leaching behaviour of natural materials and land use assessment obtained in the first stage was also augmented.

The Excel-based life cycle inventory analysis program for road constructions which has been developed on the basis of the study's results covers all the work stages from material production to road up-keep as well as the materials commonly used in the structural courses of road constructions. The environmental loading of the constructions and structural components made from the materials within the scope of the program can be calculated simply using only the dimensions of the construction and thicknesses of the structural courses and transport distances of raw materials as input data.

If necessary the program can be extended to include new materials, structural components and alternative sub-grades. It also has a worksheet enabling the comparison of pavement structures. The environmental loadings of alternative constructions can be compared as such, in relation to fixed reference or as effect scores. The program also includes a number standard graphical presentations.

To enable reliable comparisons between different constructions and to estimate the migration into the soil during the placement of the construction, the solubilities of a few of the natural mineral aggregates used in road construction and of by-products the solubility of foundry sand were tested in connection with the study.

The current state of land use assessment method development and existing literature are also outlined in this report. As possible future assessment methods procedures based on effect scoring or on a weighted analysis of material-specific land use are presented.

Alkusanat

Kaksivaiheinen tutkimus "*Maarakentamisen elinkaariarviointi*" kuuluu osana Tekesin ympäristögeotekniikkaohjelman tutkimuskokonaisuuteen "*Sivutuotteet maa- ja tierakenteissa - käyttökelpoisuuden osoittaminen*". Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa laadittiin suositus maarakenteiden elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointi- ja vertailumenettelyksi ja kokeiltiin menettelyn soveltuvuutta esimerkkitarkasteluissa. Tämän tutkimuksen toisen vaiheen tavoitteena oli siirtää esitetty suositus käytännössä hyödynnettäväksi malliksi ja luoda laskentaohjelma tavallisimpien tierakenteiden elinkaarenaikaisten ympäristövaikutusten laskemiseksi ja vertailemiseksi.

Tutkimusta rahoittivat Tekesin lisäksi tielaitos, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy, Helsingin Energia, SKJ-Yhtiöt Oy, VTT Kemiantekniikka ja VTT Yhdyskuntateknikka. Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Aarno Valkeisenmäki, tielaitos, puheenjohtaja
Jorma Havukainen, Helsingin Energia Oy
Ari Huomo, tielaitos
Lauri Kivekäs, Lohja Rudus Oy Ab Ympäristöteknologia
Marko Mäkikyrö, SKJ-yhtiöt Oy
Antti Ruotoistenmäki, VTT Yhdyskuntateknikka
Veli-Matti Uotinen, tielaitos
Esa Mäkelä, VTT Kemiantekniikka
Ulla-Maija Mroueh, VTT Kemiantekniikka, sihteeri.

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
Esko Pöyliö, Rautaruukki Oy
Ari Seppänen, ympäristöministeriö
Esa Mäkelä, VTT Kemiantekniikka, sihteeri.

Tutkimuksen projektipäällikkönä toimi erikoistutkija Ulla-Maija Mroueh, VTT Kemiantekniikka. Tutkimusryhmässä olivat mukana tutkijat Jutta Laine-Ylijoki, VTT Kemiantekniikka, Kari Wellman, VTT Kemiantekniikka ja Paula Eskola, VTT Kemiantekniikka sekä Veli-Matti Uotinen, tielaitos.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
Symboliluettelo	7
1. Johdanto	8
1.1 Lähtökohta	8
1.2 Menettelytavan periaate ja rajaukset	8
2. Ympäristökuormitustietojen täydentäminen	11
2.1 Tiemateriaaleista maaperään liukenevat aineet	11
2.1.1 Materiaalit ja menetelmät	11
2.1.2 Tulokset	12
2.1.3 Tulosten arviointi	14
2.2 Maan käyttö	16
2.2.1 Tehtyjen arviointien toteutustapa	16
2.2.2 Arviointi maarakentamisessa	17
3. Ympäristökuormitusten laskentaohjelma	19
3.1 Soveltuvuusalue	19
3.2 Rakenne ja toiminta	20
3.3 Tulostus	23
3.4 Liukoisuuksien arviointi	27
3.5 Rajaukset	28
4. Laskentaohjelman soveltaminen esimerkkikohteissa	29
4.1 Esimerkkikohteet	29
4.2 Ympäristökuormituslaskennan tulokset	32
4.2.1 Kohde 1	32
4.2.2 Kohde 2	32
4.2.3 Kohde 3	36
4.2.4 Kohde 4	37
4.2.5 Kohde 5	39
4.3 Tulosten arviointi	39
5. Yhteenveto	41
Lähdeluettelo	42
Muut tietolähteet	43

LIITTEET

1. Tutkimuksessa ja laskentaohjelmassa käytetyt pää tietolähteet eri toimintavaihtoehtoisissa ja raaka-aineissa
2. Laskentaohjelman syöttö lomakkeet
3. Laskentaohjelman tulostelomakkeet
4. Tulostus – päällysrakenneseosa
5. Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 1
6. Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 2
7. Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 3
8. Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 4
9. Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 5

Symboliluettelo

AB	Asfaltti(betoni)
BST	Bitumisora
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
L/S	Nesteen ja kiinteän aineen suhde
NO _x	Typen oksidit
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (sisältävät hiilivedyt)
YSE	Yleissementti

1. Johdanto

1.1 Lähtökohta

Tämä tutkimus on jatkoa VTT Tiedotteita 1962 -julkaisuun ”Maarakentamisen elinkaariarviointi” /Eskola *et al.* 1999/, jossa esitetään tie- ja maarakenteiden erityspiirteet huomioon otettava suositus menettelytavasta maarakentamisen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arvioimiseksi ja vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen vertailemiseksi. Menettelytapa keskittyy erityisesti sivutuotteiden ja perinteisten materiaalien vertailuun tienrakennuskäytössä, mutta soveltuu myös muiden maarakenteiden ympäristövaikutusten arviointiin.

Menettelytapaehdotus sisältää mm. tavoitteiden ja rajausten määrittelyn, luettelon arvioinnin lähtö- ja tulostiedoista, suosituksen laskentamenettelystä ja alustavan esityksen tulosten merkitysten arvioinnista.

Tutkimuksen toisessa vaiheessa menettelytapasuositus siirrettiin käytännössä hyödynnettäväksi malliksi luomalla laskentaohjelma tavallisimpien tierakenteiden elinkaarenaikaisten ympäristövaikutusten laskemiseksi ja vertailemiseksi. Lisäksi täydennettiin ensimmäisen vaiheen tietoja esimerkiksi luonnonmateriaalien liukoisuuksien sekä maan käytön arvioinnin osalta.

Tutkimuksesta on tämän julkaisun lisäksi saatavilla seuraavat raportit:

1. Maarakentamisen elinkaariarviointi, VTT Tiedotteita 1962
2. Laskentaohjelman käyttöohje 06.09.1999
3. Englanninkielinen yhteenvetoraportti (valmisteilla).

1.2 Menettelytavan periaate ja rajaukset

Menettelytavassa on otettu huomioon kaikki merkittävät tie- ja maarakentamisen elinkaaren vaiheet, joihin kuuluvat materiaalien tuotanto, kuljetukset, sijoitus tierakenteisiin, rakenteen käyttö ja käytön jälkeinen tilanne. Tierakentamisen ja käytön vaiheista on kuitenkin jätetty tarkastelun ulkopuolelle ne vaiheet, joilla ei ole merkitystä rakenteiden vertailun kannalta. Tällaisia ovat mm.

- raivaustyöt
- tienkäyttöön liittyvät toimet, kuten kaistamaalaukset, liikenne-merkkien ja valojen asennukset ja käyttö
- käytön aikainen kunnossapito, kuten aeraus, suolaus ja hiekoitus
- liikenteen päästöt.

Rakennetta tarkastellaan kokonaisuutena, koska maarakenteissa materiaalivalinta vaikuttaa usein muiden käytettävien materiaalien laatuun ja määrään, työmene-

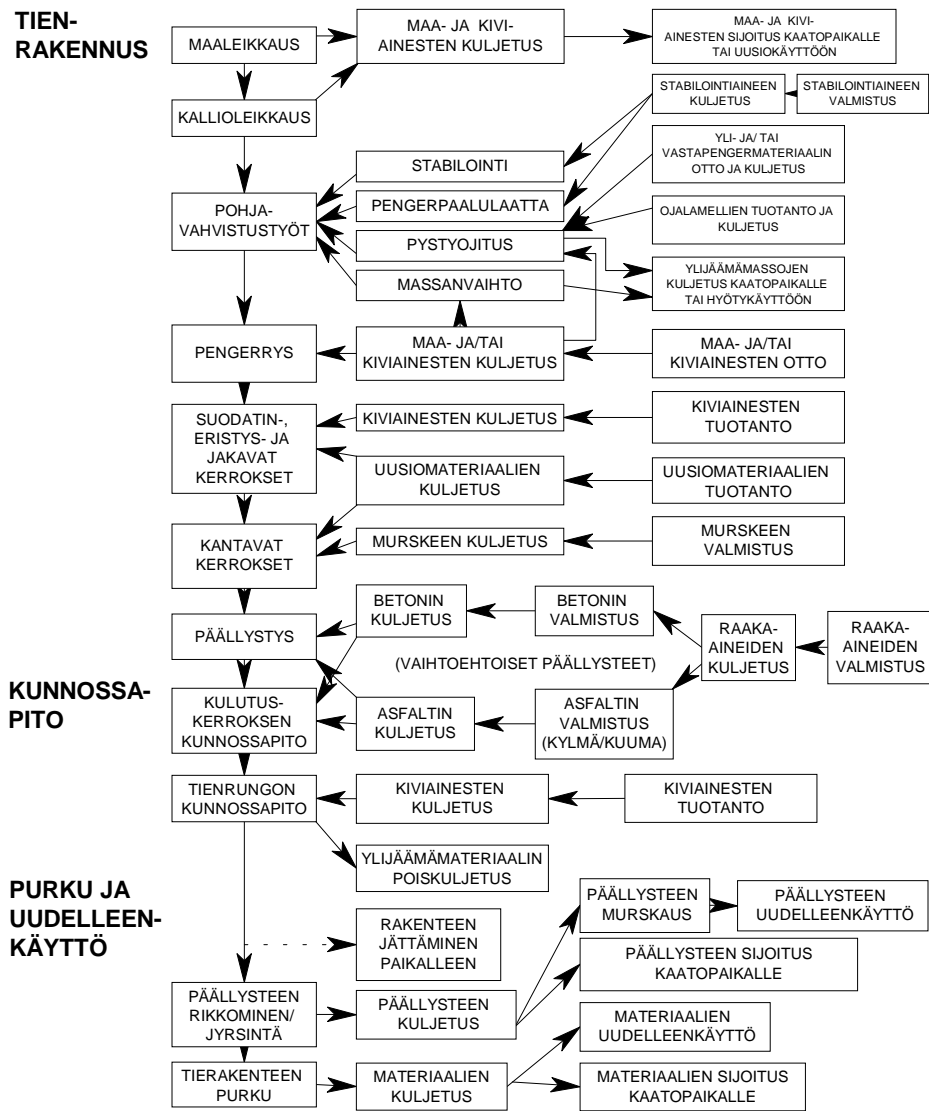
telmiin, kunnossapitotarpeeseen jne. Päällys- ja pohjarakenteet käsitellään erillisinä kokonaisuuksina, jotka yhdistetään tarpeen mukaan.

Ympäristökuormituksista tarkasteluun on valittu maarakenteiden elinkaaren aikana oleellisiksi arvioidut kuormitukset. Tarkasteltavia ympäristökuormituksia ovat raaka-aineiden käyttö, energian ja polttoaineiden käyttö, hiilidioksidi-, typpioksidi-, rikkidioksidi-, VOC-, hiilimonoksidi- ja hiukkaspäästöt ilmaan, maaperään liukenevat päästöt, inertti jäte, melu ja maankäyttö. Ympäristökuormitustiedot lasketaan rakenneosittain ja työvaiheittain (kuva 1), jolloin voidaan joustavasti tarkastella kulloinkin käsiteltävinä olevia rakennevaihtoehtoja.

Menettelytavan muut rajaukset koskevat toiminnallista yksikköä, tarkastelu-aikaa sekä käytettävissä olevaa tietoaineistoa. Menettelytapasuositukseen liitettyjen esimerkkitarkastelujen yhteydessä toiminnalliseksi yksiköksi valittiin kilometrin pituinen tieosuus ja tarkasteluajaksi 50 vuotta. Maarakentamisen paikallisen luonteen vuoksi pyrittiin käyttämään paikallisia ja materiaalikohtaisia tietoja, joita sitten puuttuvilta osin täydennettiin kansainvälisillä tiedoilla.

Ensimmäisen vaiheen esimerkkitarkasteluissa laskentamenettelynä käytettiin työvaiheittaisia Excel-pohjaisia laskentakaavioita. Käytetty menettely ei kuitenkaan sellaisenaan sovellu jatkokäyttöön, sillä toimintoja ei oltu yhdistetty yhtenäiseksi laskentamalliksi. Laskelmien toistamisen helpottamiseksi ja ympäristövaikutusten ottamiseksi mukaan osaksi tierakenteiden suunnittelua laskentamenettely koottiin tutkimuksen toisessa vaiheessa selkeäksi laskentamalliksi.

Tutkimuksen molemmat vaiheet tehtiin saatavilla olevia tietoja käyttäen. Ensimmäisessä vaiheessa pyrittiin käyttämään suomalaista tietoa. Käytetyt tietolähteet on esitetty liitteessä 1. Tutkimuksen toisessa vaiheessa tietoja täydennettiin erityisesti tien kulutuskerroksen kunnostuksen, muutaman pohjarakenteen sekä liukoisuuksien osalta.



Kuva 1. Tierakenteiden elinkaaritarkasteluissa huomioon otettavat rakentamisen ja käytön päivvaiheet. (Eskola et al. 1999)

2. Ympäristökuormitustietojen täydentäminen

2.1 Tiemateriaaleista maaperään liukenevat aineet

Tierakenteista maaperään kohdistuvien haittojen arvioinnin tavoitteena on tarkastella koko rakenteesta ja sen eri kerroksista maaperään liukenevia päästöjä. Lisäksi sivutuotteista liukenevien aineiden määriä tulee voida verrata vastaavissa kohteissa käytettävistä luonnon kiviaineksista liukeneviin määriin.

Laskentamenettelyn liukoisuusarviointi perustuu sekä sivutuotteiden että luonnon kiviainesten osalta useiden Suomessa ja ulkomailla tehtyjen liukoisuustestituloksien avulla määritettyihin ns. keskimääräisiin liukoisuuksiin. Vakioina ohjelmaan sisällytettyjen keskimääräisten pitoisuuksien perusteella laskentaohjelma laskee kutakin rakennevaihtoehtoa vastaavat liukoisuudet. Luonnon kiviaineksista sekä masuunihiekasta liukoisuustietoja oli kuitenkin erittäin vähän saatavilla, minkä vuoksi eri materiaalien vertailtavuuden parantamiseksi ja koko rakenteen maaperään kohdistuvien haittojen arvioimiseksi tutkimuksen toisessa vaiheessa selvitettiin muutamien, tierakenteissa yleisesti käytettävien luonnonmateriaalien sekä sivutuotteista masuunihiekan liukoisuutta.

2.1.1 Materiaalit ja menetelmät

Liukoisuustestein tutkitut tierakentamisessa käytettävät materiaalit, niiden raekoot sekä näytteiden ottopaikat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Liukoisuustesteissä tutkitut materiaalit.

Luonnonmateriaali	Raekoko	Näytteenottopaikka
Kalliomurske	0 - 50 mm	Kehä II, Espoo
Kalliomurske	0 - 16 mm	Kehä II, Espoo
Suodatinkerroksen hiekka		Kehä II, Espoo
Sora rintauksesta		Latoistenmaa, Hyvinkää
Hiekka rintauksesta		Latoistenmaa, Hyvinkää
Kalliomurske	0 - 16 mm	Latoistenmaa, Hyvinkää
Soramurske	0 - 50 mm	Latoistenmaa, Hyvinkää
Masuunihiekka		
Masuunihiekka		

Liukoisuusominaisuuksien arviointia varten käytettiin kahta eri liukoisuustestiä:

- pH-olosuhteiden vaikutusta eri aineiden liukoisuuteen tutkittiin **pH-staattisella testillä** (akkreditoitu menetelmä KET 3601697). Testeissä näytettä

(noin 100 g) sekoitettiin 24 tuntia tislatussa vedessä L/S-suhteessa 10 ja seoksen pH-arvo säädetään happoliuoksella haluttuun tavoite-pH-arvoon käyttäen automaattista titrauslaitteistoa. L/S-suhteella tarkoitetaan tässä veden määrää (L) suhteessa sekoituksessa käytetyn kiinteän materiaalin määrään (S). Sekoituksen jälkeen seos suodatettiin. Tässä työssä tarkasteltiin liukoisuutta vain tavoite-pH-arvossa 4, joka kuvaa ääritilannetta ympäristössä.

- **CEN-pikaravistelutestissä** (akkreditoitu menetelmä KET 3600697) kiinteää materiaalia ravistellaan kuusi tuntia tislatussa veden kanssa niin, että L/S-suhde eli testissä käytettävän vesimäärän (L) suhde kiinteän materiaalin määrään (S) on 2. Tämän jälkeen näyte suodatetaan, minkä jälkeen kuivaamatonta materiaalia ravistellaan vielä 18 tuntia L/S-suhteessa 8 (ts. kumulatiivinen L/S-suhde 10). VTT käyttää uuttoliuoksena hapanta vettä (pH 4). Menetelmän epävarmuudeksi arvioimme $\pm 30\%$.

Masuunihiekan pH-staattisissa testeissä käytettiin tavoite-arvoina pH-arvoja 5, 6 ja 8 eikä tavoitearvoa 4, sillä tasapainotilannetta ei suuren haponkulutuksen vuoksi voitu saavuttaa.

Kaikkien näytteiden suodoksista määritettiin yhteensä 11 komponentin pitoisuudet. Tutkitut komponentit olivat: kadmium (Cd), kromi (Cr), mangaani (Mn), vanadiini (V), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), sinkki (Zn), arseeni (As), molybdeeni (Mo), kupari (Cu) sekä sulfaatti (SO_4^{2-}). Käytettyjen analyysien periaatteet olivat:

Cd, Cr, Mn, V, Ni, Pb, As, Mo, Cu:	atomiabsorptiospektrometrisesti grafiittiuuniteknikalla
Zn:	atomiabsorptiospektrometrisesti liekkiteknikalla
SO_4^{2-} :	ionikromatografisesti

2.1.2 Tulokset

Liukoisuustestien tulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3. CEN-testissä saatujen tulosten perusteella tutkittujen komponenttien liukoisuudet luonnonmateriaaleista olivat erittäin pieniä. Kadmiumin, kromin, lyijyn ja sinkin liukoisuudet sekä luonnonmateriaaleista että masuunihiekasta alittivat käytettyjen analyysimenetelmien määrittysrajat. Sen sijaan masuunihiekasta liukeni vanadiinia jonkin verran.

Taulukko 2. CEN-testien tulokset.

Näyte	pH	mg/kg										
		Cd	Cr	Mn	V	Ni	Pb	Zn	As	Mo	Cu	SO ₄ ²⁻
L/S 2												
Kalliomurske 0-50 mm	7,9	<0,0002	<0,004	0,026	<0,01	<0,004	<0,004	<0,04	0,006	<0,02	0,006	1,4
Kalliomurske 0-16 mm	7,9	<0,0002	<0,004	0,006	<0,01	<0,004	<0,004	<0,04	0,006	0,02	0,004	19,6
Suodatinkerroksen hiekka	7,2	<0,0002	<0,004	0,036	<0,01	<0,004	<0,004	<0,04	<0,006	<0,02	<0,002	46,1
Sora rintauksesta	7,3	<0,0002	<0,004	0,128	<0,01	<0,004	<0,004	<0,04	<0,006	<0,02	0,010	18,1
Hiekka rintauksesta	6,3	<0,0002	<0,004	0,072	<0,01	0,004	<0,004	<0,04	<0,006	<0,02	0,004	13,0
Kalliomurske 0-16 mm	8,0	<0,0002	<0,004	0,018	<0,01	<0,004	<0,004	<0,04	<0,006	0,03	0,004	16,4
Soramurske 0-50 mm	7,4	<0,0002	<0,004	0,120	<0,01	<0,004	<0,004	<0,04	<0,006	0,03	0,002	14,4
Masuunihiekka (1)	11,0	<0,0002	<0,004	0,211	0,40	<0,004	<0,004	<0,04	<0,006	<0,02	<0,002	44,3
Masuunihiekka (2)	11,5	<0,002	<0,008	<0,01	0,30	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	58,0
L/S 10												
Kalliomurske 0-50 mm	9,1	<0,001	<0,02	0,13	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	0,02	2,1
Kalliomurske 0-16 mm	9,2	<0,001	<0,02	0,05	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	0,03	<0,1	0,01	20,7
Suodatinkerroksen hiekka	7,7	<0,001	<0,02	0,11	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	<0,01	55,4
Sora rintauksesta	7,5	<0,001	<0,02	0,34	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	0,03	25,0
Hiekka rintauksesta	7,0	<0,001	<0,02	0,37	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	0,01	16,1
Kalliomurske 0-16 mm	9,2	<0,001	<0,02	0,08	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	<0,01	23,8
Soramurske 0-50 mm	7,7	<0,001	<0,02	0,39	<0,05	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	0,02	17,8
Masuunihiekka (1)	11,4	<0,001	<0,02	0,30	1,75	<0,02	<0,02	<0,2	<0,03	<0,1	<0,01	75,2
Masuunihiekka (2)	11,6	<0,01	<0,05	<0,05	1,50	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,1	109,3

pH-staattisista testeistä saatujen tulosten perusteella luonnonmateriaaleista liukeni kuparia sekä Kehä II:lta otetusta kalliomurskeesta (0 - 50 mm) merkittäviä määriä nikkeliä tutkitussa pH-arvossa. Muiden tutkittujen komponenttien liukoisuudet olivat tutkitussa pH-arvossa melko pieniä. Lisäksi masuunihiekasta liuenneet pitoisuudet olivat tutkituissa pH-arvoissa pieniä.

Taulukko 3. pH-staattisten testien tulokset.

Näyte	pH	mg/kg										
		As	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn	V	SO ₄ ²⁻
Kalliomurske 0-50 mm	4	<0,04	<0,01	<0,10	5,00	18,26	<0,05	90,32	0,16	1,83	<0,05	0,96
Kalliomurske 0-16 mm	4	<0,04	<0,01	<0,10	1,34	10,51	<0,05	0,22	0,20	1,34	<0,05	19,11
Suodatinkerroksen hiekka	4	<0,04	<0,01	<0,10	<0,10	0,83	<0,05	<0,04	<0,02	0,30	<0,05	30,73
Sora rintauksesta	4	<0,04	<0,01	<0,10	6,51	7,67	<0,05	0,34	0,05	0,97	<0,05	14,57
Hiekka rintauksesta	4	<0,04	<0,01	<0,10	<0,10	0,83	<0,05	<0,04	<0,02	0,30	<0,05	30,73
Kalliomurske 0-16 mm	4	<0,04	<0,01	<0,10	0,86	17,59	<0,05	0,18	0,10	2,54	<0,05	21,50
Soramurske 0-50 mm	4	<0,04	<0,01	<0,10	0,97	13,60	<0,05	0,26	<0,02	0,80	<0,05	9,72
Masuunihiekka	5	<0,04	<0,01	<0,10	<0,10	66,61	<0,05	<0,04	<0,02	0,09	0,33	85,37
Masuunihiekka	6										0,53	
Masuunihiekka	8										0,48	

2.1.3 Tulosten arviointi

Tutkimuksessa saatuja uusia liukoisuustuloksia hyödynnetään ympäristökuormituslaskentaohjelman liukoisuusarvioinnin tietoaineiston täydentämisessä ja keskimääräisten liukoisuusvakioiden määrittämisessä. Luonnon kiviaineksista on kuitenkin yleisesti erittäin vähän liukoisuustietoja saatavilla, joten saatujen tulosten edustavuutta on vaikea arvioida. Esimerkiksi alueelliset erot eri aineiden esiintymisessä voivat aiheuttaa merkittäviä eroja liukoisuustuloksissa. Verrattaessa saatuja liukoisuustuloksia (L/S-suhde 2) ruotsalaisiin luonnonmateriaaleista saatuihin tuloksiin (taulukko 4), havaitaan, että molemmissa tutkimuksissa liukoisuudet luonnonmateriaaleista ovat erittäin pieniä. Eroja on havaittavissa lähinnä kalliomurskeen ja soran osalta nikkelin liukoisuustuloksissa sekä lisäksi kuparin liukoisuudessa sorasta.

Taulukko 4. Luonnonkiviaineksista liukenevien aineiden määriä L/S-suhteessa 2 (Kälvesten 1996).

	Murske mg/kg	Sora mg/kg
Cd	0,0002	0,0002
Cr	0,002	0,002
Cu	0,009	0,003
Ni	0,04	0,06
Pb	0,002	0,002
Zn	0,015	0,017

CEN-pikaravistelutestin tuloksia voidaan karkeasti verrata hollantilaisiin kolonnitestissä liukeneville aineille esitettyihin ohjearvoihin (taulukko 5). Ohjearvot on annettu maanrakennuskäyttöön, mutta kuitenkin eri testille (kolonnitesti). Suoritetut testit eivät siten korvaa kolonnitestiä ympäristövaikutustutkimuksessa.

Taulukko 5. Hollantilaiset kolonnitestille esitetyt (kumulatiivinen L/S 10) enimmäispitoisuusehdotukset granuloiduille rakennusmateriaaleille esimerkkitapaauksessa, jossa materiaalikerroksen paksuus sijoituskohteessa on 0,7 m. (Aalbers et al. 1993)

Haitta-aine	Kolonnitestissä liuenneille aineille annetut enimmäispitoisuusohjeet, mg/kg	
	Ryhmä 1*	Ryhmä 2**
Arseeni (As)	0,88	7,0
Kadmium (Cd)	0,032	0,066
Kromi (Cr)	1,3	12
Molybdeeni (Mo)	0,28	0,91
Nikkeli (Ni)	1,1	3,7
Kupari (Cu)	0,72	3,5
Lyijy (Pb)	1,9	8,7
Vanadiini (V)	1,6	32
Sinkki (Zn)	3,8	15
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	750	22 000

Huom. Verrattaessa taulukossa esitettyjä tuloksia enimmäispitoisuusohjeisiin on huomioitava, että ohjeet on annettu eri testille.

*ryhmä 1: lähes rajoitukseton käyttö maarakentamisessa

**ryhmä 2: käyttö maarakentamisessa siten, että veden pääsy materiaaliin on estetty ja materiaali sijoitettu vähintään 0,5 metriä pohjaveden tason yläpuolelle.

CEN-testillä tutkituista luonnonmateriaalinäytteistä lienneet metallimäärät alittivat tai olivat lähellä vastaavia menetelmille annettuja määritysrajoja ja alittivat siten selvästi myös kolonnitestille esitetyn ryhmän 1 enimmäisliukoisuusohjeen (taulukko 5). Myös sulfaatin liukoisuus kaikista tutkituista näytteistä alitti enimmäispitoisuusarvot. Sen sijaan vanadiinin liukoisuus masuunihiekasta oli lähellä kolonnitestissä maarakentamiskäyttöön ryhmälle 1 annettua enimmäispitoisuusarvoa.

pH-staattisten testien tulosten perusteella mangaanin liukoisuus luonnonmateriaaleista ja masuunihiekasta kasvaa, kun suodoksen pH pidetään arvossa 4, joka kuvaa ääritapausta sijoituskohteessa. Mangaanille ei ole kuitenkaan esitetty liukoisuusohjeita. Kuparin liukoisuus luonnonmateriaaleista lisääntyi pH-staattisissa testeissä ja ylitti näytteiden 1, 2, 4, 6 ja 7 osalta kolonnitestissä maarakentamiskäyttöön ryhmälle 1 annetut enimmäispitoisuusarvot. Lisäksi Kehä II:lta otetun kalliomurskeen (näyte 1) nikkelpitoisuus ylitti merkittävästi enimmäispitoisuusarvot, kun suodoksen pH pidettiin arvossa 4. Sen sijaan masuunihiekasta lienneet pitoisuudet olivat tutkituissa pH-arvoissa pieniä ja alittivat kolonnitestissä maarakentamiskäyttöön ryhmälle 1 annetut enimmäispitoisuusarvot.

2.2 Maan käyttö

Maan käyttö on maarakenteiden elinkaariarviointiin oleellisesti kuuluva ympäristökuormitus. Maan käytön arviointimenetelmät ovat kuitenkin edelleen erittäin kehittymättömiä, eivätkä yksinkertaistetut arviointitulokset kuvaa luotettavasti maan käytön todellista merkitystä. Yhtenäisten menetelmien kehittäminen on ongelmallista, sillä maan käytön seurauksia ei tunneta tarkasti ja vaikutukset ovat usein paikallisesti sekä kohdekohtaisesti määräytyviä. Useimmissa elinkaariarvioissa maankäyttö onkin jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Maarakentamisessa maan käyttö, esimerkiksi luonnon materiaalien hankinnassa, on kuitenkin vaikutuksiltaan niin merkittävä, että sitä tulisi voida arvioida.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa maan käyttöä arvioitiin eri rakennevaihtoehtojen tarvitseman pinta-alan mukaan siten, että huomioon otettiin tien alle jäävä tai läjitykseen tarvittava pinta-ala. Luonnon raaka-aineiden oton maankäyttöä ei kuitenkaan voitu selvittää arvioinnin hankaluuden vuoksi. Maan käytön huomioon ottamiseksi ja maarakentamiseen soveltuvien kriteerien määrittämiseksi selvitettiin maan käytön arviointimenetelmien tilannetta sekä kirjallisuutta. Lisäksi arvioitiin esille tulleiden kriteerien soveltuvuutta maarakentamisen maankäytön arviointiin.

2.2.1 Tehtyjen arviointien toteutustapa

Maan käytön arviointimenetelmiin liittyvää kirjallisuutta on vain hyvin vähän saatavilla. Lisäksi valtaosa maan käytön arviointikirjallisuudesta koskee maan käytön vaikutusten arviointia maa- ja metsätaloudessa, mitä ei sellaisenaan voida soveltaa maarakentamiseen. Taulukkoon 6 on koottu muutamia kirjallisuudessa esitettyjä, mahdollisesti sovellettavissa olevia maan käytön arviointimenetelmiä.

Taulukko 6. Kirjallisuudessa esitettyjä maankäytön arviointimenetelmiä.

Heijungs <i>et al.</i> 1992	Maankäyttö lasketaan inventaarissa pinta-alan ja käyttöajan mukaan (m ² a). Jos maankäyttö on hyvin pitkäaikaista, se määritellään loppukäytöksi ja esitetään pelkästään pinta-alana.
Inicki 1994	Maa-alueen eri maisemaelementtien, kuten lampien ja metsiköiden, ekologista ja maisemallista arvoa arvioidaan pisteyttämällä maisemaelementikohtaisiin perusteisiin valittuja tekijöitä asteikolla 1-5. Maa-alueen maisemallinen arvo tietyllä morfologisella alueella saatiin laskemalla kunkin alueen maisemaelementtien pisteet yhteen ja jakamalla kokonaispistemäärä alueen pinta-alalla. Maisemallista arvoa kuvaavan kertoimen avulla maa-alueet jaettiin kolmeen eri luokkaan: korkean ekologisen ja maisemallisen arvon maa-alat, kohtalaisen ekologisen ja maisemallisen arvon maa-alat sekä vähäisen ekologisen ja maisemallisen arvon maa-alat.
Knöpfel 1996	Maa-alueet jaotellaan maankäytön perusteella viiteen eri luokkaan: luonnollinen maa (natural land), muunneltu maa (modified land), viljelty maa (agricultural land), esikaupunki- ja kaupunkimaa (suburban ja urban land) sekä eristetty alue. Kullekin luokalle annettiin eri arviointikriteereihin perustuvat painokertoimet, minkä jälkeen maankäyttöä arvioitiin alkuperäisen ja uuden käyttötavan erotuksena.
Walpole 1994	Maankäytön hallinnan kustannusarvioinnin perustana on seuraavia maan käyttöä kuvaavia parametrejä; maanlaadun huononemistapa, maaperätyyppi, kaltevuus, nykyinen käyttötapa, mahdolliset toimintavaihtoehdot. Kukin parametri sisälsi kahdesta viiteen vaihtoehtoa. Arviointia varten laskettiin sitten käytännössä mahdollisten toimintamallien yhdistelmien sisältämien vaiheiden yhteiskustannukset.

2.2.2 Arviointi maarakentamisessa

Elinkaariarviointien yhteydessä maan käyttöä voidaan arvioida esimerkiksi sanallisesti, kunnes luotettavia arviointikriteerejä on saatavilla. Luotettavien maan käytön arviointikriteerien määrittäminen osoittautui erittäin ongelmalliseksi, eikä sellaisia siten voitu tässä projektissa esittää. Arviointikriteerien puuttuessa ei maan käyttöä myöskään voitu vielä tässä vaiheessa liittää laskentaohjelmaan yhtenä maarakentamisen ympäristövaikutuksena. Tulevaisuudessa arviointikriteerit voisivat kuitenkin perustua esimerkiksi pisteytykseen tai materiaalikohtaisen maankäyttöpinta-alan tarkasteluun.

Pisteytys

Maan käytön merkittävyyttä maarakentamisessa voidaan tarkastella esimerkiksi viisiportaisella pisteyttävällä asteikolla. Pisteytyksessä otetaan huomioon materiaalien tuotannon vaatima pinta-ala, materiaalien saatavuus alueella sekä mahdollisesti myös käyttöalueen herkkyyks. Lisäksi pisteytykseen tulisi jollain tasolla voida sisällyttää maan käyttöajan tai aiheutuneen muutoksen pysyvyyden arviointi.

Materiaalikohtaisen maankäytön arviointi

Maarakentamisen maankäytön arvioinnissa maan käyttöä voidaan tarkastella myös materiaaleittain siten, että arvioinnissa otetaan huomioon kaikkien materiaalin merkittävät maan käyttöä vaativat elinkaaren vaiheet aina materiaalien tuotannosta tien alle jäävän maan käyttöön saakka. Taulukossa 7 on esitetty muutamien maarakentamisessa käytettävien luonnonmateriaalien, sivutuotteiden sekä asfaltin elinkaarenaikaiset maapinta-alaa vaativat tai maisemaan vaikuttavat toiminnot.

Taulukko 7. Materiaalikohtainen maankäyttö.

Materiaali	Toiminto					
	Kiviaineksen otto	Valmistus- asema	Murskaus- asema	Väli- varastointi	Läjitys	Tien alle jäävä ala
<i>Luonnonmateriaalit</i>						
Hiekka	X			X		X
Murske	X		X	X		X
Sora	X		X	X		X
<i>Sivutuotteet</i>						
Lentotuhka		X			X	X
Betonimurske			X	X	X	X
Masuunihiekka				X	X	X
Kappalekuona				X	X	X
Kuonamurske			X	X	X	X
<i>Muut</i>						
Asfaltti		X				

Materiaalikohtaisessa tarkastelussa voidaan ottaa huomioon kokonaismateriaalimäärä, materiaalikohtainen käytetty maa-ala sekä maan käytön kesto. Kokonaismateriaalimäärä kuvaa karkeasti materiaalin vaatimaa tilaa. Käytetty maa-ala taas sisältää kunkin toiminnon vaatiman alan. Toimintojen aloina voidaan käyttää keskimääräisiä maanottoalueiden pinta-aloja, tuotantoalueiden ohjeistuksen mukaisia minimipinta-aloja sekä materiaalikohtaisia varastointialueiden pinta-aloja.

Maan käytön kesto voidaan arvioida toiminnon kestoajan tai muutoksen pysyvyyden perusteella. Osa materiaalikohtaisista toiminnoista on luonteeltaan lyhytaikaisia, kun taas joidenkin toimintojen vaikutukset ovat maiseman kannalta pysyviä tai maisemaa muuttavia esimerkiksi mahdollisen maisemoinnin vuoksi. Lisäksi luonnonmateriaalien maanottoalueen kriteerien määrittelyssä tulee ottaa huomioon, että osa luonnonmateriaalien hankintatoiminnasta tapahtuu kaavoituksen osoittamilla alueilla ja osa tierakentamisen yhteydessä suoraan tielinjan alle jäävältä alueelta.

3. Ympäristökuormitusten laskentaohjelma

3.1 Soveltuvuusalue

Tutkimuksessa luotu Excel-pohjainen laskentaohjelma soveltuu erilaisten maanrakenteiden ympäristökuormitusten rutiinomaiseen laskentaan, kun maarakenteiden elinkaariarviointi toteutetaan periaatteessa kuvan 1 mukaisesti. Lähtökohdiana on suunnittelijan määrittelemä tierakenne tai osa rakenteesta, johon tarvittavat materiaalit ja rakenneosien paksuudet on määritetty. Lisäksi tulee tuntea työmaalle tuotavien ja sieltä muualle kuljetettavien materiaalien kuljetusmatkat ja -tavat, materiaalin liukoisuustiedot sekä sivutuotteiden läjitysalueajoitus huomioottaessa kuljetusmatkat läjitysalueelle. Tietojen puuttuessa voidaan käyttää arvioita keskimääräisistä kuljetusmatkoista sekä ohjelman sisältämiä, yleisiä oletusliukoisuustietoja.

Laskentaohjelmassa käytetty menettely perustuu julkaisussa ”Maarakentamisen elinkaariarviointi” /Eskola *et al.* 1999/ kuvattuun suositukseen menettelytavasta maarakentamisen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arvioimiseksi ja vaihtoehtoisten rakennerratkaisujen vertailemiseksi. Laskentaohjelma perustuu joitain täydennyksiä lukuun ottamatta ensimmäisessä vaiheessa koottuun tietoa-ineistoon. Tietoja on täydennetty lähinnä tien kulutuskerroksen kunnostuksen, joidenkin pohjarakenteiden sekä liukoisuustietojen osalta. Laskentaohjelmassa käytetty tietoaaineisto on esitetty liitteessä 1.

Ohjelmassa tarkasteltavia ympäristökuormituksia ja -vaikutuksia ovat:

- energian kulutus, kWh (polttoaineen kulutus, l tai l/t)
- raaka-aineiden käyttö (luonnon raaka-aineet / sivutuotteet)
- CO₂, kg
- NO_x, kg
- SO₂, kg
- VOC, kg
- hiukkaset, kg
- CO, kg
- pöly, kg
- meluaika, dBAh
- liukoisuus.

Lisäksi ohjelmassa otetaan huomioon mm. kuljetusmatka (km).

Laskentaohjelma sisältää tien elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten laskemiseen tarvittavat tiedot seuraavista päällysrakenteissa käytettävistä materiaaleista:

Penger materiaalit:	Hiekka, murske
Suodatinkerroksen materiaalit:	Hiekka, masuunihiekka
Jakavan kerroksen materiaalit:	Lentotuhka, lentotuhka ja sementti, betonimurske, masuunihiekka, sora, kappalekuona, kuonamurske, murske
Kantavan kerroksen materiaalit:	Betonimurske, kuonamurske, murske, bitumistabilointi
Päällysteet:	AB16, AB20, ABK, SMA

Tien päällysrakenteen elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset jaotellaan ohjelmassa materiaalikohtaisesti seuraaviin päävaiheisiin:

- Materiaalien massat
- Materiaalien tuotanto
- Materiaalien kuljetus (taajama/maaseutu)
- Materiaalien sijoitus rakenteeseen
- Tien kunnossapito
- Liukoisuus.

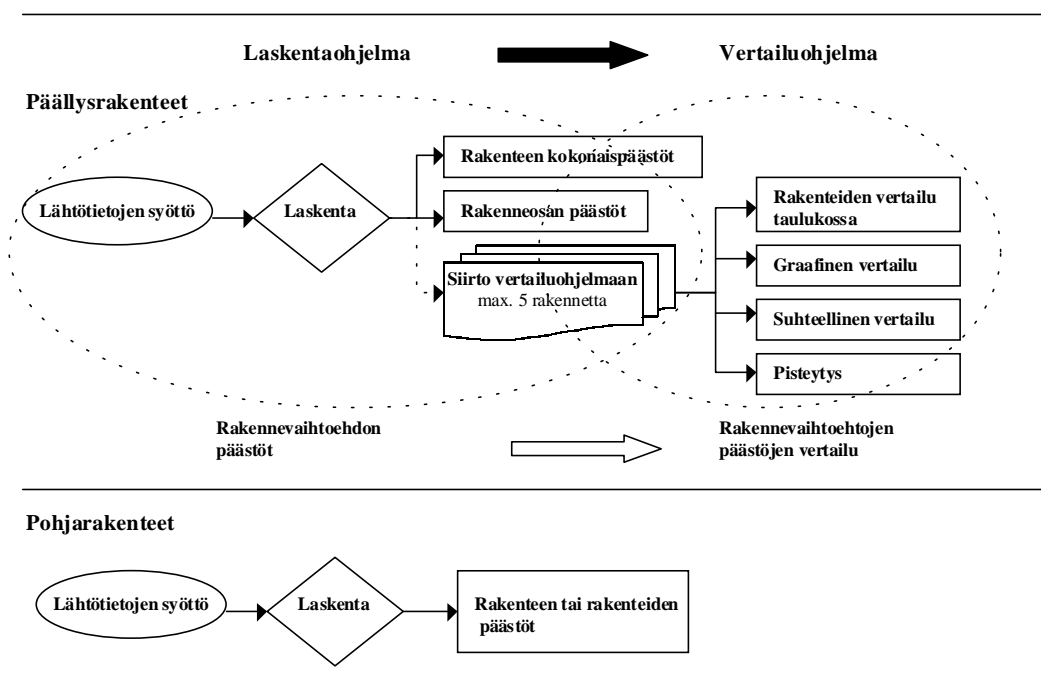
Ympäristökuormitusten laskennassa tien ylä- ja pohjarakenteet tarkastellaan erillisinä, jotka voidaan yhdistää tarpeen mukaan. Laskentaohjelman sisältämät pohjarakennevaihtoehdot ovat:

- Massanvaihto
- Massastabilointi sementillä ja kalkilla
- Pilaristabilointi sementillä ja kalkilla
- Pystyjoitus + ojituskerros + väliaikainen painopenger
- Pengerpaalulaatta.

Ohjelmaa voidaan laajentaa uusilla materiaaleilla, ylärakennesilla tai pohjarakennevaihtoehdoilla. Lisäksi eri päällysrakenteiden vertailua varten ohjelmaa on laajennettu erillisellä vertailun mahdollistavalla laskentataulukolla. Vertailuohjelmassa tarkasteltavia rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksia voidaan vertailla sellaisenaan, suhteutettuina tai pisteytettyinä. Ohjelma sisältää myös useita valmiita graafisia malliesityksiä.

3.2 Rakenne ja toiminta

Laskentaohjelma koostuu kahdesta erillisestä pöytäluokasta ja niihin linkitettyistä kuudesta lomakkeesta (taulukko 8). Ohjelman periaate on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Laskentaohjelman toimintaperiaate.

Taulukko 8. Laskentaohjelman rakenne.

1. Syöttö - päällysrakenne	Tien päällysrakenteen määrittely käyttäjän toimesta
2. Tuloste - päällysrakenneosa	Tien eri päällysrakenneosien päästöjen tulostus
3. Tuloste - päällysrakenne	Tien päällysrakenteen päästöjen tulostus taulukkoina ja graafisesti
4. Siirto vertailuun	Tulosten siirto vertailuohjelmaan
5. Syöttö - pohjarakenne	Pohjarakenteiden määrittely käyttäjän toimesta
6. Tuloste - pohjarakenne	Pohjarakennevaihtoehtojen päästöjen tulostus
7. Päällysrakenteet	Päällysrakenteiden ympäristökuormituslaskennan tietoaineisto
8. Pohjarakenteet	Pohjarakenteiden ympäristökuormituslaskennan tietoaineisto

Laskennan kohteena olevan tierakenteen määrittely tapahtuu käyttäjän toimesta erillisillä syöttölomakkeilla, minkä jälkeen ympäristökuormituslaskennan tulokset tulostuvat käyttäjälle välittömästi tulostelomakkeilla sekä taulukkomuodossa että valmiina graafisina esityksinä. Esimerkkejä syöttö- ja tulostelomakkeista on esitetty liitteissä 2 ja 3.

Tien päälly- ja pohjarakenteiden varsinainen ympäristökuormitusten laskenta tapahtuu käyttäjän syöttölomakkeille antamien tietojen perusteella vastaavissa materiaali- ja työvaihekohtaiset tiedot sisältävissä päätaulukoissa. Ohjelman nor-

maali, rutiininomainen käyttö ei kuitenkaan edellytä muiden kuin *syöttö-, tuloste- ja siirto vertailuun* -taulukkosivujen käyttöä. Ainoastaan haluttaessa laajentaa ohjelmaa uusilla materiaaleilla, ylärakenneosilla tai pohjarakennevaihtoehdoilla tulee muutokset tehdä päätaulukkoissa, joista tiedot voidaan tarvittaessa linkittää jo olemassa oleville tai uusille, käyttäjäystävällisemmille syöttö- tai tuloslomakkeille.

Päällysrakenteiden ympäristökuormitusten laskennan tulokset tulostuvat automaattisesti myös valmiille siirtopohjalle, mikä mahdollistaa yksittäisen päällysrakenteen tulosten siirtämisen erilliseen päällysrakenteiden vertailuohjelmaan. Vertailuohjelman avulla voidaan, esimerkiksi kohdekohtaisesti, vertailla viiden eri päällysrakenteen ympäristökuormituksia. Vertailuohjelma koostuu neljästä toisiinsa linkitetystä taulukosta:

<u>Vertailu</u>	Tulosten tuonti laskentaohjelmasta Vertailurakenteen valinta
<u>Vertailukuva</u>	Vertailtavien päällysrakenteiden kuormitukset <ul style="list-style-type: none"> - energian kulutus, kWh ja polttoaineen kulutus, l - CO₂, kg - NO_x, kg - SO₂, kg - VOC, kg - CO, kg - pöly, kg - raaka-aineiden käyttö (luonnon raaka-aineet) Suhdekertoimen valinta
<u>Suhteelliset</u>	Vertailtavien päällysrakenteiden ympäristökuormitukset suhteessa vertailurakenteen kuormituksiin
<u>Pisteytys</u>	Vertailtavien päällysrakenteiden pisteytys

Vertailuohjelman pisteytyksessä kohdekohtaisten päällysrakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset muutetaan ensin suhteelliseksi arvoiksi käyttäen perustasona käyttäjän valitseman vertailurakenteen ympäristökuormitusarvoja. Suhteellisten ympäristökuormitustasojen laskennan jälkeen tärkeimmät ympäristökuormitusryhmät suhteutetaan toisiinsa kertomalla suhteelliset kuormituspisteet tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa määritetyillä vertailupisteillä (taulukko 9).

Taulukko 9. Vertailuohjelman pisteytyksessä käytetyt ympäristökuormitustekijäkohtaiset suhteelliset pisteet.

Ympäristökuormitustekijä	Pisteluku
Energian kulutus, kWh	7,5
Polttoaineen kulutus, l	7,5
CO ₂ , kg	6,7
NO _x , kg	6,5
SO ₂ , kg	5,9
VOC, kg	5
CO, kg	5
Pöly, kg	5,5
Meluaika, dBAh	3,1
Luonnonmateriaalit	10

3.3 Tulostus

Tien päällysrakenteen, päällysrakenneosien sekä määriteltyjen pohjarakenteiden kokonaispäästöt tulostuvat käyttäjälle automaattisesti tulostelomakkeilla sekä taulukkumuodossa että useina valmiina graafisina esityksinä. Tulostelomakkeiden sisältämät tuloskentät on esitetty liitteessä 4.

Päällysrakenteen osalta tulostaulukoissa tulostuvat erikseen sekä päällystetyille että päällystämättömälle rakenteelle koko rakenteen ympäristökuormitukset seuraavasti eriteltynä: valitun tarkasteluajan kokonaisympäristökuormitukset, päällysrakenteen rakentamisen ja kunnostuksen aikaiset yhteenlasketut kuormitukset sekä rakentamiskuormitukset päävaiheittain. Lisäksi ympäristökuormitukset tulostuvat päällysrakenneosakohtaisesti järjestyksessä: penger → suodatinkerros → jakava kerros → kantava kerros → päällyste.

Pohjarakenteiden ympäristökuormituslaskennan tulokset soveltuvat sekä kohdekohtaiseen eri rakennevaihtoehtojen aiheuttamien päästöjen vertailuun että tarkasteltavassa tieosuudessa käytettyjen pohjarakenteiden aiheuttamien kokonaisympäristökuormitusten laskemiseen. Määriteltyjen pohjarakenteiden ympäristökuormitukset tulostuvat pohjarakennetyypeittäin eriteltynä: valitun rakenteen tai valittujen rakenteiden rakentamisen aikaiset kokonaisympäristökuormitukset käytetyt raaka-aineet sekä läjitykseen viedyt materiaalmäärät.

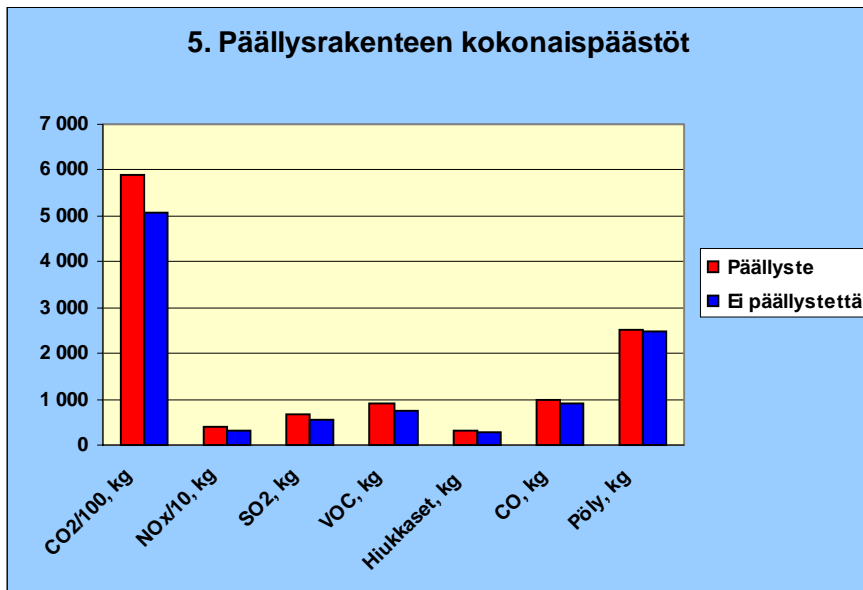
Sekä laskenta- että vertailuohjelma sisältävät useita valmiita graafisia malliesityksiä. Taulukkoihin 10 ja 11 on koottu ohjelmien sisältämät graafiset esitykset sekä kuviin 3 - 6 esimerkkejä graafisista mallitulosteista.

Taulukko 10. Laskentaohjelman sisältämät graafiset esitykset.

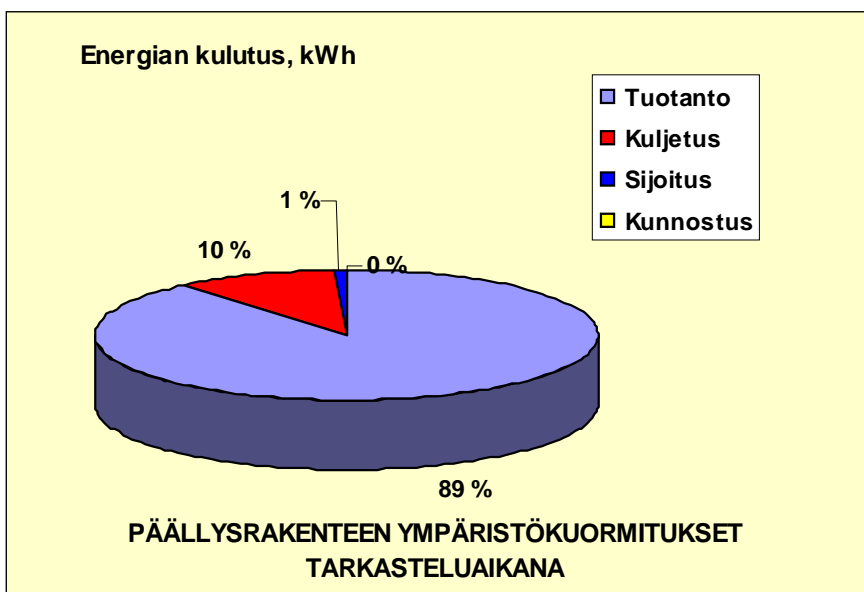
Taulukkosivu	Graafiset esitykset
<i>Päällysrakenteet</i>	
Tuloste-päällysrakenneosa	1. Haitta-aineiden liukoisuus rakenneosittaisena palkkidiagrammina
Tuloste-päällysrakenne	2. Työvaiheittainen pylväsdiagrammi päällystetylle rakenteelle 3. Työvaiheittainen ympyrädiagrammi päällystetylle rakenteelle 4. Yhteenvedo pylväsdiagrammi päällystetylle rakenteelle 5. Yhteenvedo pylväsdiagrammi päällystetystä ja päällystämättömästä rakenteesta 6. Työvaiheittainen ympyrädiagrammi päällystämättömälle rakenteelle 7. Työvaiheittainen pylväsdiagrammi päällystämättömälle rakenteelle 8. Yhteenvetopylväsdiagrammi päällystämättömälle rakenteelle
<i>Pohjarakenteet</i>	
Tuloste-pohjarakenne	9. Ympäristökuormituskohtainen pylväsdiagrammi pohjarakennetyypeittäin

Taulukko 11. Vertailuohjelman sisältämät graafiset esitykset.

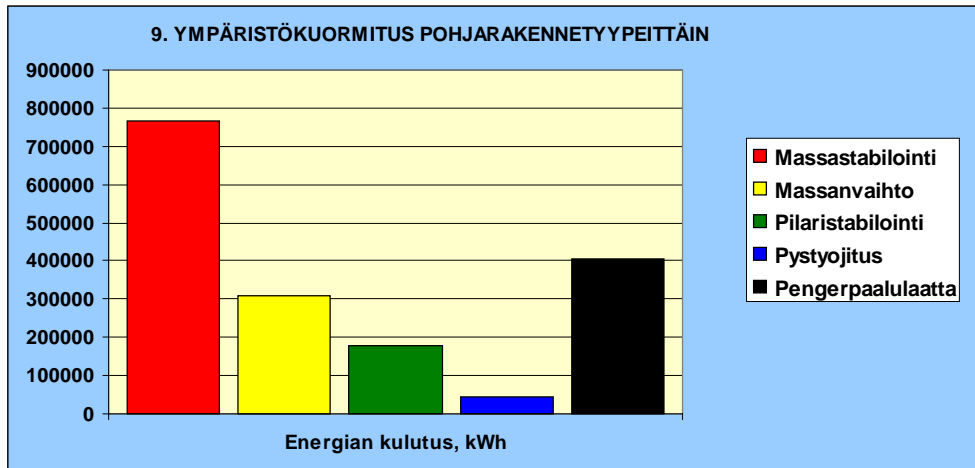
Taulukkosivu	Graafiset esitykset
Vertailu	1. Ympäristökuormituskohtainen pylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista rakenneosittain 2. Ympäristökuormituskohtainen pylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista työvaiheittain 3. Haitta-ainekohtainen pylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista rakenneosittain 4. Yhteenvetopylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista sadan vuoden aikana liukenevista haitta-aineista verrattuna hollantilaisiin ohjearvoihin
Vertailukuva	5. Yhteenvetopylväsdiagrammi vertailtavien päällysrakenteiden suhteutetuista ympäristökuormituksista
Suhteelliset	6. Ympäristökuormituskohtainen pylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista suhteutettuna 7. Ympäristökuormituskohtainen pylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista suhteutettuna työvaiheittain 8. Kolmiulotteinen yhteenvetopylväsdiagrammi vertailtavien päällysrakenteiden suhteutetuista päästöistä 9. Yhteenvetopylväsdiagrammi vertailtavien päällysrakenteiden suhteutetuista päästöistä
Pisteytys	10. Yhteenvedopalkkidiagrammi vertailtavista päällysrakenteista pisteytettynä ja ympäristökuormituskohtaisesti eriteltyinä 11. Ympäristökuormituskohtainen, kolmiulotteinen yhteenvetopylväsdiagrammi vertailtavien päällysrakenteiden pisteytetyistä päästöistä 12. Ympäristökuormituskohtainen yhteenvetopylväsdiagrammi vertailtavien päällysrakenteiden pisteytetyistä päästöistä 13. Ympäristökuormituskohtainen pylväsdiagrammi vertailtavista päällysrakenteista pisteytettynä



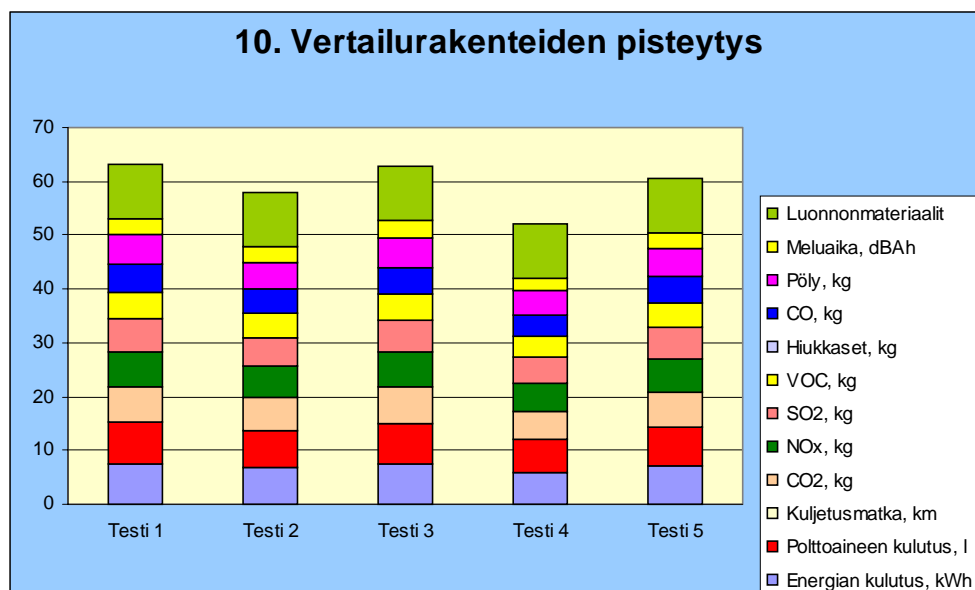
Kuva 3. Kuvitteellinen esimerkki laskentaohjelman mallitulosteesta. Päälysrakenteen kokonaispäästöt.



Kuva 4. Kuvitteellinen esimerkki laskentaohjelman mallitulosteesta. Päälysrakenteen ympäristökuormituskohtaiset päästöt.



Kuva 5. Kuvitteellinen esimerkki laskentaohjelman mallitulosteesta. Pohjarakenteiden ympäristökuormituslaskennan tulostus.



Kuva 6. Kuvitteellinen esimerkki vertailuohjelman mallitulosteesta. Pisteytysvertailu.

3.4 Liukoisuuksien arviointi

Laskentaohjelmassa rakenteesta liukenevien haitta-aineiden määrää arvioidaan laskemalla rakenteen läpi suotautuvan veden määrä suhteessa materiaalimäärään (ns. L/S-suhde). Liukoisuus materiaalista vastaa testissä samassa L/S-suhteessa liuennutta määrää. L/S-suhde lasketaan kullekin rakennevaihtoehdolle, kuten tutkimuksen ensimmäisessäkin vaiheessa, seuraavasti:

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

t on tarkasteltava aikaväli ensimmäisen suotoveden ilmaantumisen lähtien [v].

l on suotautumisnopeus [mm/v]

d on jätteen tiheys [kg/m³]

h on jätekerroksen paksuus [mm].

Laskentaohjelmassa liukoisuuden tarkasteluajaksi (= t) on määritelty 100 vuotta. Rakenne oletetaan asfaltilla peitettyksi, jolloin suotautumisnopeutena käytetään 6 mm:ä/v (Wahlström ja Laine-Ylijoki 1996b).

Materiaalien liukoisuusarvioinnissa on otettu huomioon seuraavat 15 haitta-ainetta: sulfaatti, fluoridi, kloridi, arseeni, kadmium, kromi, kupari, elohopea, molybdeeni, nikkeli, lyijy, seleeni, vanadiini, sinkki ja alumiini. Liukoisuusarvioinnissa käytetään ensimmäisestä vaiheesta poiketen L/S-suhteille 2 ja 10 määriteltyjä keskimääräisiä liukoisuuksia, jotka perustuvat useisiin Suomessa ja ulkomailla tehtyihin liukoisuustestituloksiin (Wahlström *et al.* 1999). Vakioina ohjelmaan sisällytettyjen keskimääräisten pitoisuuksien perusteella laskentaohjelma laskee kunkin rakennevaihtoehdon L/S-suhteita vastaavat liukoisuudet. Asfaltista ja sementistä liukenevia aineita tai sementin haitta-aineiden liukoisuutta vähentävää vaikutusta ei kuitenkaan ole voitu ohjelmassa ottaa huomioon.

Muutamien materiaalien osalta tietoaineistoa joidenkin haitta-aineiden tutkituista liukoisuuksista ei ollut saatavilla. Keskimääräisten liukoisuuksien määrittäminen tai liukoisuuksien yleinen arviointi näistä materiaaleista ja haitta-aineista ei siten ollut mahdollista, mikä tulee myös ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa. Laskentaohjelmassa kyseinen tilanne havaitaan nollaliukoisuutena, jotka tulee käsitellä tulkinnassa erikseen. Liukoisuuden luotettavan arvioinnin tulisikin yleensä aina perustua riittävän yksityiskohtaisiin ja kattaviin materiaaliikohtaisiin testituloksiin. Liukoisuuksien arviointi ei ollut mahdollista seuraavista materiaaleista ja haitta-aineista:

Luonnonmateriaalit:	fluori, kloori, elohopea, seleeni, alumiini
Betonimurske:	fluori, seleeni
Masuunihiekat ja -kuonat:	fluori, kloori, elohopea, seleeni, alumiini

Päällysrakenteesta liukenevien aineiden määrä esitetään ohjelmassa yksikköinä mg/kg ja mg/m². Lisäksi päällysrakenteesta liukenevien haitta-aineiden liukoi-

suutta verrataan VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallittuun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m^2) kohti sadan vuoden aikana.

3.5 Rajaukset

Laskentaohjelman perusteet, tarkastelun rajaukset sekä tietolähteet on pääpiirteittäin esitetty julkaisussa ”Maarakentamisen elinkaariarviointi” /Eskola *et al.* 1999/. Joiltakin osin laskentaohjelma mahdollistaa kuitenkin edellistä laajemman tarkastelun.

Laskentaohjelmassa toiminnallinen yksikkö määritellään ja valitaan tapauskohtaisesti, sillä uuden rakenteen ympäristökuormitusten laskenta perustuu lähtötietoina annettaviin rakennemittoihin.

Tien kunnostuksen on tässä tarkastelussa oletettu kohdistuvan ainoastaan kulutuskerrokseen. Mahdollisina kunnostustapoina ovat uudelleenpäällystys ja Remixer-toimenpide. Laskennassa huomioitujen toimenpiteiden lukumäärää ei kuitenkaan ole ennalta rajattu tiettyyn tarkastelu-aikaan, vaan ne voidaan tapauskohtaisesti valita. Myös esilämmitysmenetelmä on valittavissa.

Kuljetusten osalta laskentaohjelma mahdollistaa materiaalikohtaisen kuljetusympäristön (kuljetus taajamassa tai maaseudulla) sekä kuljetusetäisyyden huomioon ottamisen. Eri kuljetusympäristöjen erot aiheutuvat erilaisista polttoaineen kuluksista ja päästökertoimista. Materiaali voidaan myös tuottaa työmaalla, jolloin kuljetuksen ympäristökuormitukset jätetään huomioimatta.

Liukoisuuden tarkastelu-aika on määritelty 100 vuodeksi. Päällysrakenteesta liukenevien aineiden määrä on esitetty sekä yksikköinä mg/kg että mg/m^2 , minkä lisäksi liukenevien haitta-aineiden liukoisuutta on verrattu VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallittuun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m^2) kohti sadan vuoden aikana.

Vertailuohjelmassa pisteytys suoritetaan vertaamalla pisteytettäviä päällysrakenteita käyttäjän itse valitsemaan vertailurakenteeseen. Vertailupäällysrakenteen valinta on siten jätetty käyttäjän ratkaistavaksi. Pisteytys tapahtuu kertomalla rakenteiden ympäristökuormitusten suhde julkaisussa ”Maarakentamisen elinkaariarviointi” /Eskola *et al.* 1999/ määritetyillä painokertoimilla.

4. Laskentaohjelman soveltaminen esimerkki-kohteissa

Kehitettyä laskentaohjelmaa testattiin soveltamalla sitä neljän tierakentamiskohteen eri päällysrakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten laskentaan. Lisäksi vertailtiin eri pohjarakennetyyppien ympäristökuormituksia yhdessä tierakentamiskohteessa.

4.1 Esimerkkikohteet

Päällysrakenteittain vertailtavat rakentamiskohteet olivat :

Kohde 1:

Tien leveys: 10,5 m

Tien pituus: 4 100 m

Päällysteen leveys: 10 m

	Päällysrakennevaihtoehdot								
	Luonnonmateriaali			Masuunikuona			Betonimurske		
	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km
Päällyste 1	AB 20	0,04	5 maaseutu	AB 20	0,04	5 maaseutu	AB 20	0,04	5 maaseutu
Päällyste 2	ABK	0,06	5 maaseutu	ABK	0,06	5 maaseutu	ABK	0,06	5 maaseutu
Kantava kerros	kallio- murske	0,25	9 maaseutu	kuona- murske	0,1	8 maaseutu	betoni- murske	0,15	105 maaseutu
Jakava kerros	kallio- murske	0,25	48 maaseutu	kappale- kuona	0,35	8 maaseutu	betoni- murske	0,2	105 maaseutu
Suodatinkerros									
Penger									

Kohde 2:

Tien leveys: 10 m

Tien pituus: 100 m

Päällysteen leveys: 9,5 m

	Päällysrakennevaihtoehdot					
	ABK+soramurske			BST+soramurske		
	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km
Päällyste 1	AB 20	0,04	14 maaseutu	AB 20	0,04	14 maaseutu
Päällyste 2	ABK	0,06	14 maaseutu			
Kantava kerros	murske	0,2	15 maaseutu	BST	0,15	14 maaseutu
Jakava kerros	soramurske	0,7	15 maaseutu	soramurske	0,9	15 maaseutu
Suodatinkerros						
Penger						

Kohde 3:

Tien leveys: 8 m

Tien pituus: 100 m

Päällysteen leveys: 7 m

	Päällysrakennevaihtoehdot					
	Luonnonmateriaali			Lentotuhka + YSE 6 %		
	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km
Päällyste 1	AB 16	0,05	5 maaseutu	AB 16	0,05	5 maaseutu
Päällyste 2	ABK	0,06	5 maaseutu			
Kantava kerros	kallio- murske	0,25	2 maaseutu	BST	0,15	5 maaseutu
Jakava kerros	kallio- murske	0,45	2 maaseutu	lentotuhka + YSE	0,5	15 maaseutu
Suodatinkerros	hiekkä	0,3	65 maaseutu	hiekkä	0,3	65 maaseutu
Penger						

Kohde 4:

Tien leveys: 7 m

Tien pituus: 1000 m

Päällysteen leveys: 6 m

Päällysrakennevaihtoehdot						
	Luonnonmateriaali			Betonimurske		
	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km	Materiaali	Paksuus m	Kuljetus km
Päällyste 1	AB 20	0,1	5 taajama	AB 20	0,1	5 taajama
Päällyste 2	ABK	0,06	5 taajama			
Kantava kerros	kallio-murske	0,15	10 taajama	betoni-murske	0,21	5 taajama
Jakava kerros	kallio-murske	0,8	10 taajama	kallio-murske	0,8	10 taajama
Suodatinkerros						
Penger						

Pohjarakenteittain vertailtava rakentamiskohde oli:

Kohde 5:

Tien leveys: 10,5 m

Tien pituus: 300 m

Pehmeikön syvyydet: 6 m muut ja 9 m pengerraalulaatta

Tiepenkereen kokonaispaksuus: 3 m

Rakennetyyppi	Kuljetusmatkat	Muut tiedot
Massastabilointi	Sementin kuljetus: 60 km maaseutu ja 5 km taajama	Sementtiä: 40 kg/m ² Kalkkia: 40 kg/m ²
Massanvaihto	Materiaalin poisto: 1 km maaseutu Raaka-aineen kuljetus: 1 km maaseutu	
Pilaristabilointi	Sementin kuljetus. 60 km maaseutu ja 5 km taajama	Pilarikoko: 0,7 m k/k: 0,7 m Sementtiä: 65 kg/m ² Kalkkia: 65 kg/m ²
Pystyjoitus	Ojanauhojen kuljetus Suomessa: 100 km maaseutu ja 10 km taajama Muiden kerrosten materiaalin kuljetus: 20 km maaseutu	Muut kerrokset: 0,5 m k/k: 1 m
Pengerraalulaatta	Paalusementin kuljetus: 40 km maaseutu ja 5 km taajama Paalujen kuljetus: 45 km maaseutu ja 5 km taajama	Paalukoko: 0,3 m k/k: 2,75 m

4.2 Ympäristökuormituslaskennan tulokset

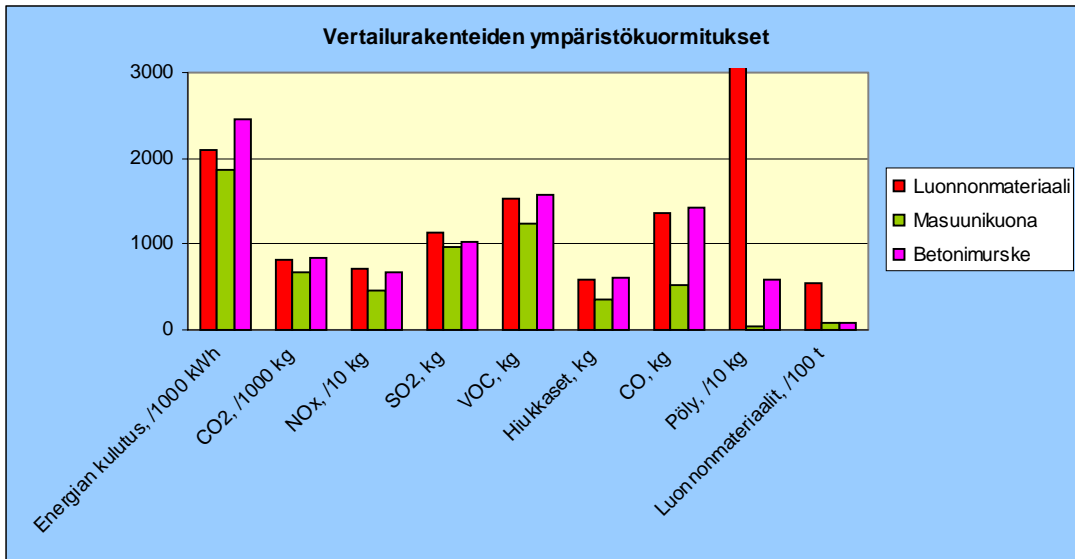
Kohteiden 1 - 5 ympäristölaskennan tulokset on esitetty graafisesti kuvissa 7 - 19. Lisäksi kohdekohtaiset tulokset on koottu liitteisiin 5 - 9.

4.2.1 Kohde 1

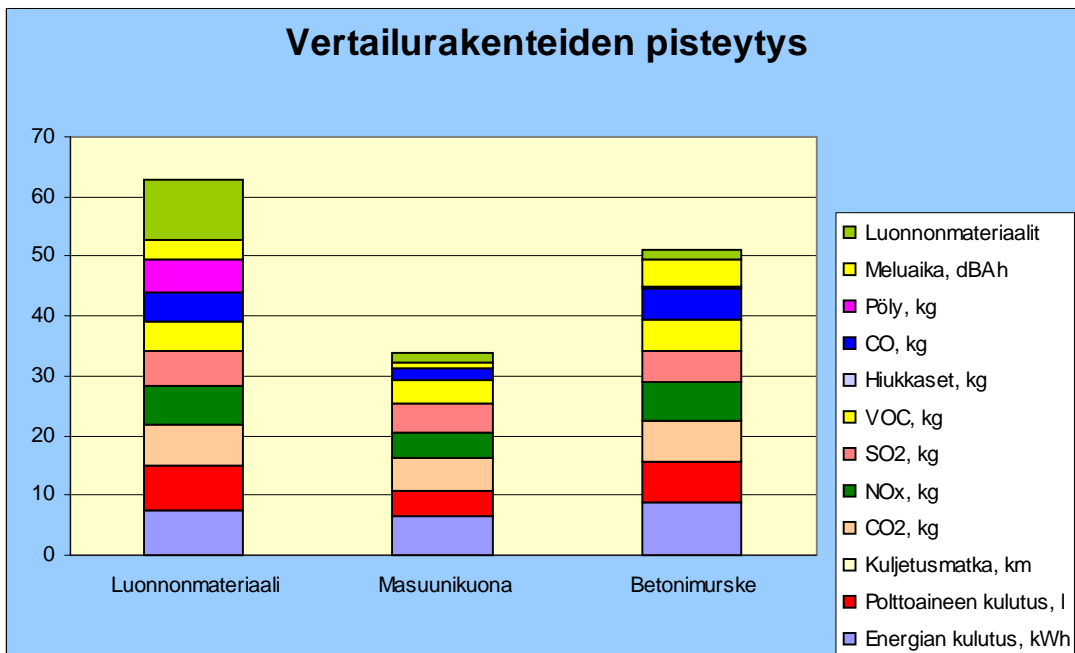
Kohteen 1 eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten välillä oli jonkin verran eroja (kuva 7). Luonnonmateriaalirakenteessa kiviaineksen murskauksen ja louhinnan suuri osuus lisäsi pölypäästöjä. Pisteytyksessä, jossa muiden päällysrakennevaihtoehtojen suhteutettuja ympäristökuormituksia verrattiin vertailurakenteena käytettävän luonnonmateriaalirakenteen ympäristökuormitukseen erottui luonnonmateriaalien käytön merkittävyys kuormitustekijänä (kuva 8). Minkään rakenteen liukoisuudet eivät ylittäneet käytettyä ohjearvotasoa sadan vuoden aikana (kuva 9). Liukoisuus luonnonmateriaalirakenteista on vähäistä, mutta maasuonikuona- ja betonimurskerakenteista liukeni jonkin verran sulfaattia. Lisäksi betonimurskerakenteesta liukeni pieniä määriä kadmiumia ja kuparia.

4.2.2 Kohde 2

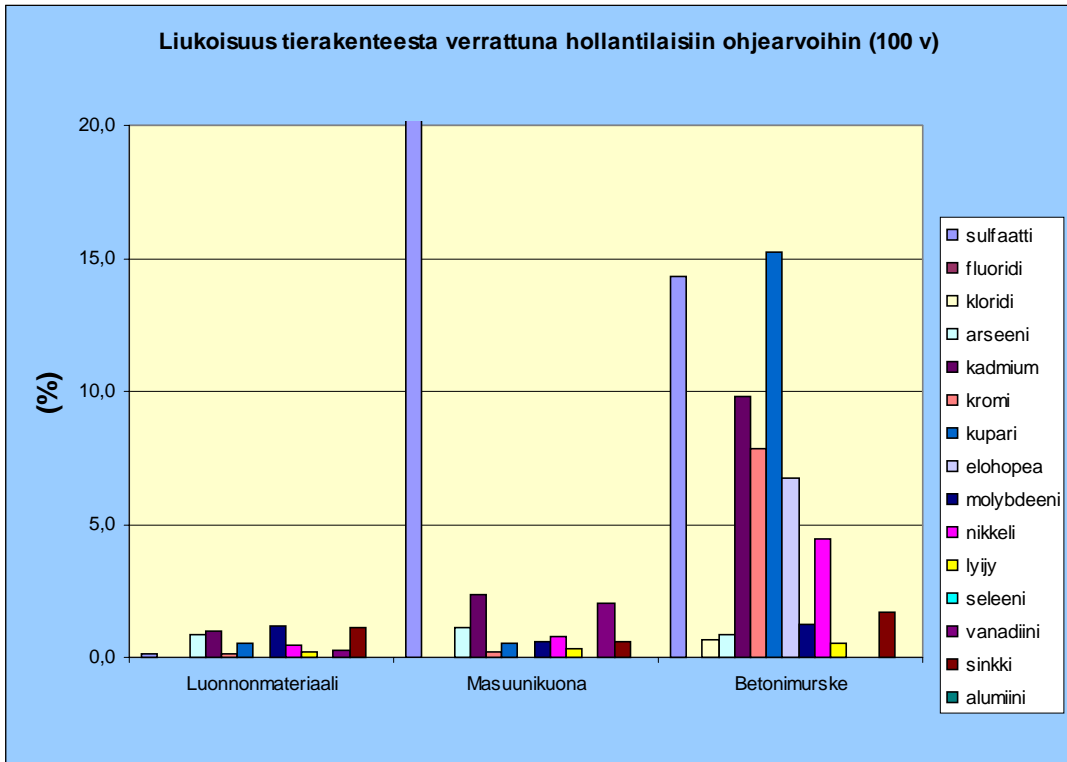
Kohteen 2 ympäristövaikutuksissa esiintyvät erot aiheutuvat pääasiallisesti murskeen ja soran käytön erilaisista kuormituksista (kuva 10). Kohteen alkuperäisiin rakenteisiin jouduttiin ohjelman asettamien rajoitusten vuoksi tekemään yksinkertaistuksia, joten tulokset eivät täysin vastaa todellisuutta kohteessa. Kummankin rakenteen liukoisuudet olivat erittäin pienet eivätkä siten ylittäneet käytettyä ohjearvotasoa sadan vuoden aikana (kuva 12). Laskentaohjelman sisältämä liukoisuusarviointi ei kuitenkaan ota huomioon asfaltista mahdollisesti liukenevia aineita.



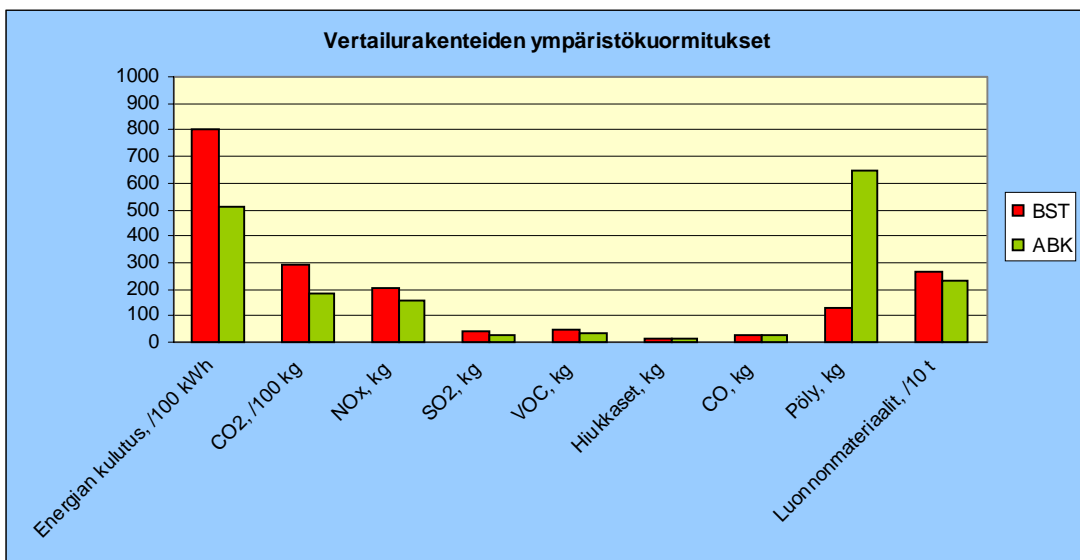
Kuva 7. Yhteenvedo kohteen 1 eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksista.



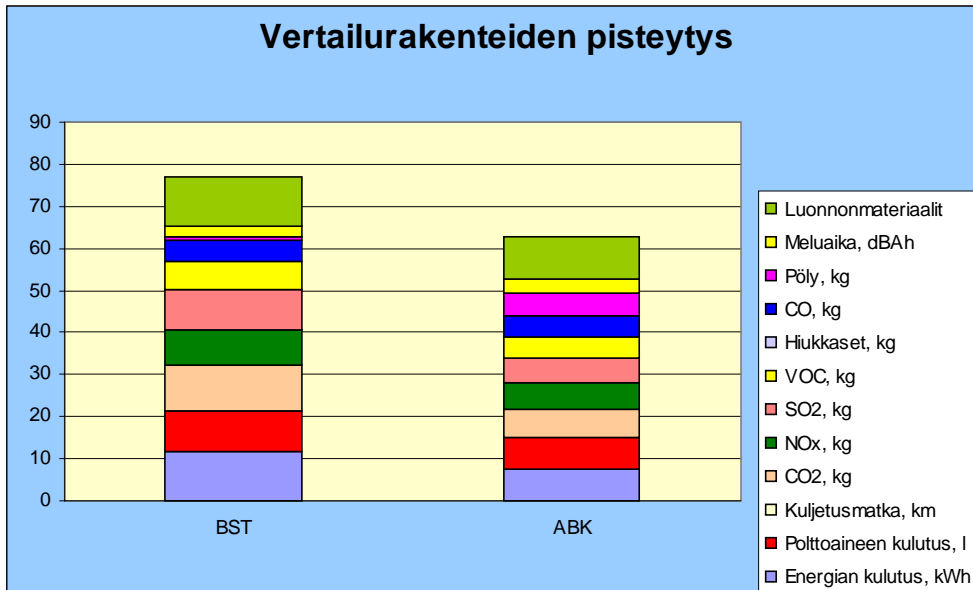
Kuva 8. Yhteenvedo kohteen 1 eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten pisteytyksestä.



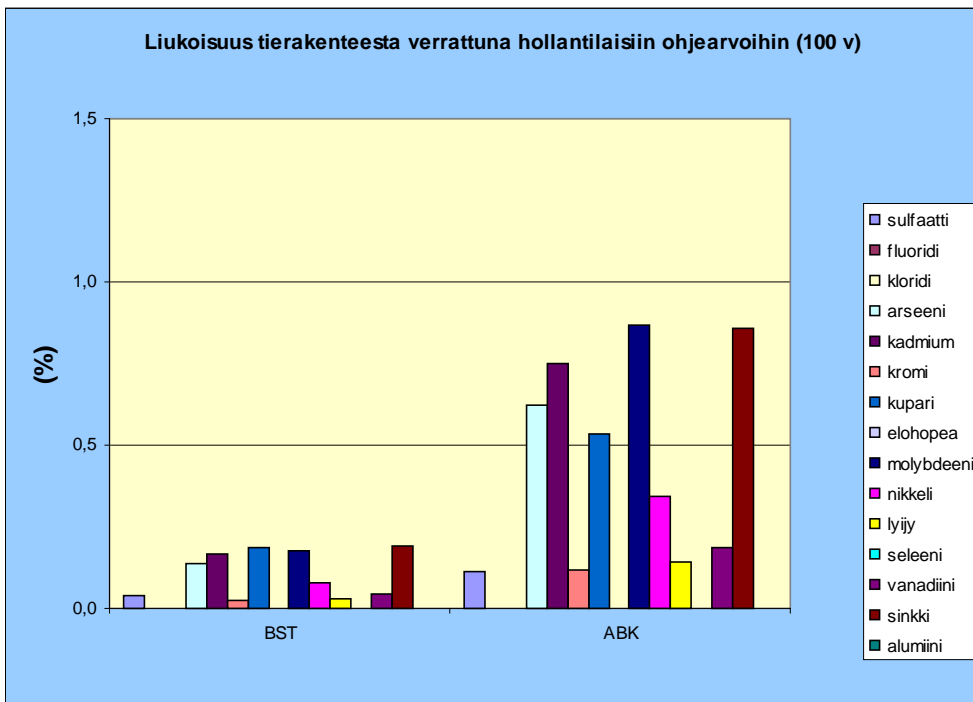
Kuva 9. Kohteen 1 eri rakennevaihtoehdoista liukenevat haitta-aineet verrattuna VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallittuun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m²) kohti sadan vuoden aikana.



Kuva 10. Yhteenveto kohteen 2 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksista.



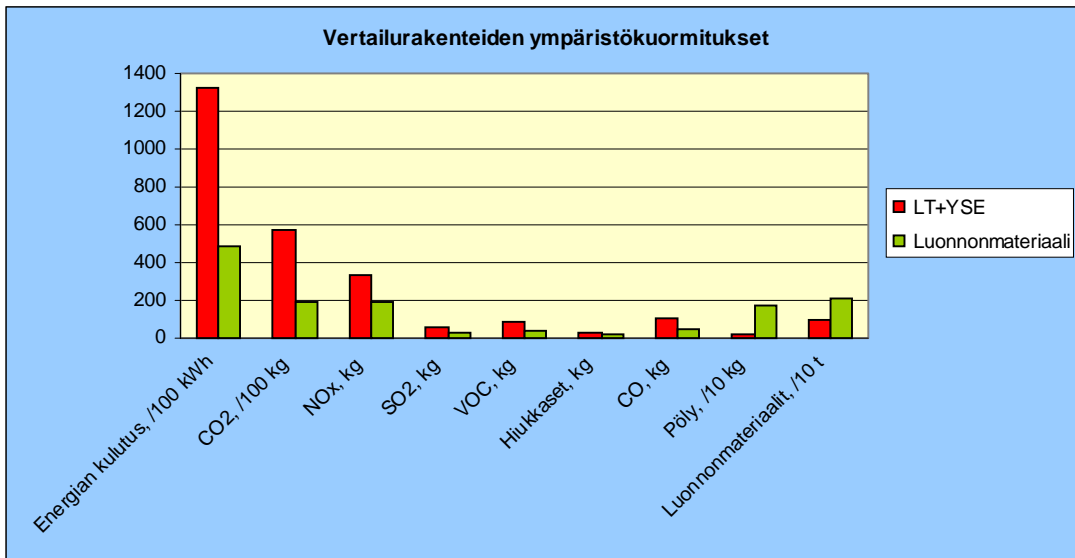
Kuva 11. Yhteenveto kohteen 2 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten pisteytyksestä.



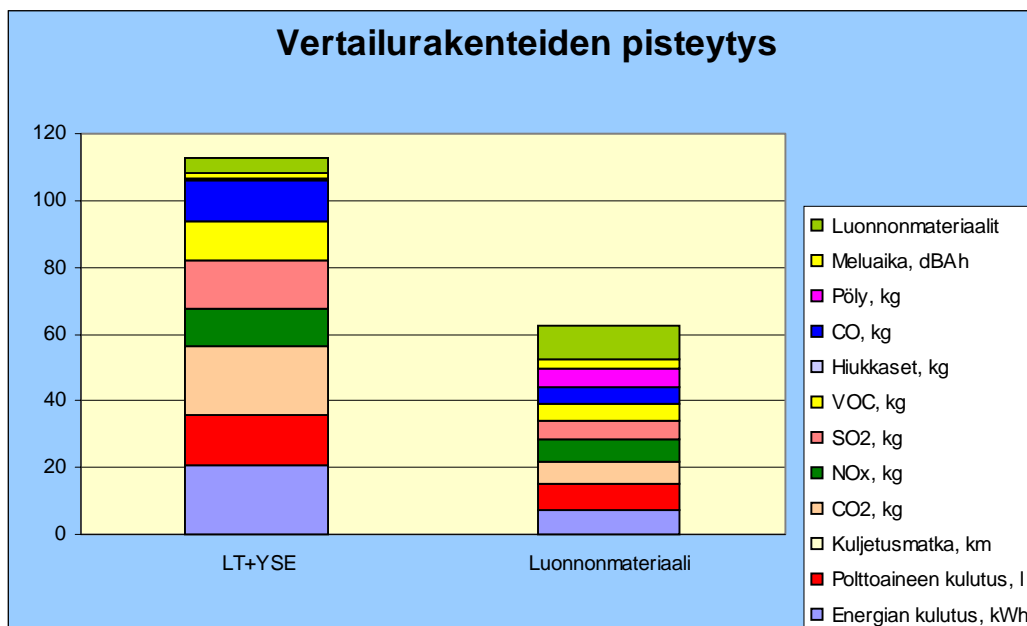
Kuva 12. Kohteen 2 rakennevaihtoehtoista liukenevat haitta-aineet verrattuna VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallittuun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m^2) kohti sadan vuoden aikana.

4.2.3 Kohde 3

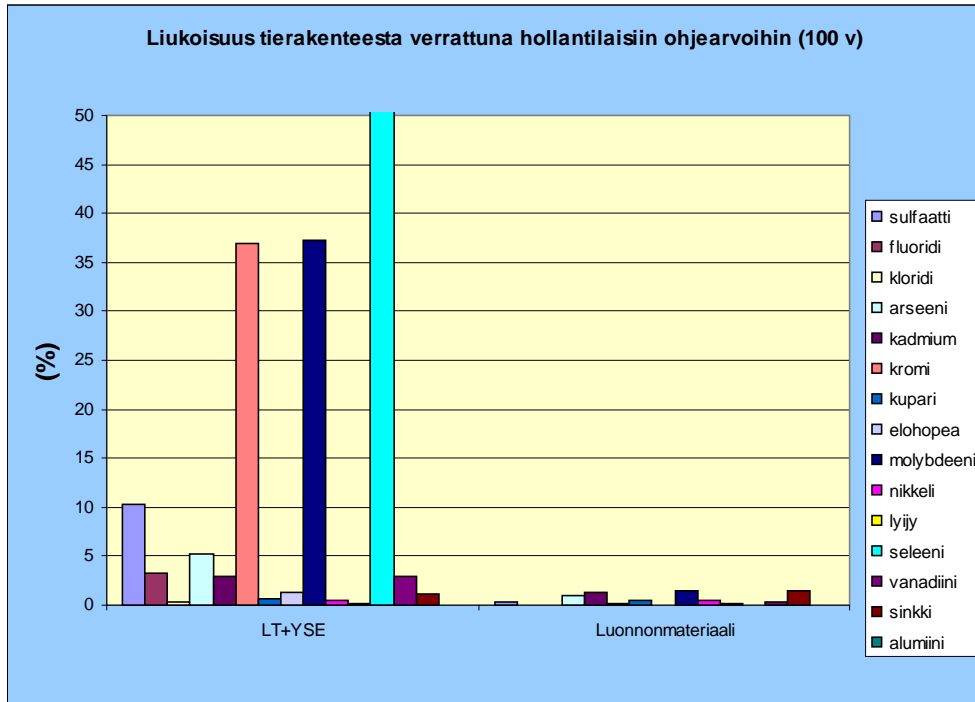
Kohteen 3 ympäristökuormituksissa voidaan havaita lisäaineena lentotuhkarakenteessa käytetyn sementin huomattava vaikutus moniin ympäristökuormituksiin (kuvat 13 ja 14). Molemmista rakenteista liukenevien aineiden määrät alittavat käytetyt ohjearvotasot 100 vuoden aikana, mutta lentotuhkarakenteesta liukeni jonkin verran seleeniä, molybdeeniä ja kromia (kuva 15).



Kuva 13. Yhteenveto kohteen 3 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksista.



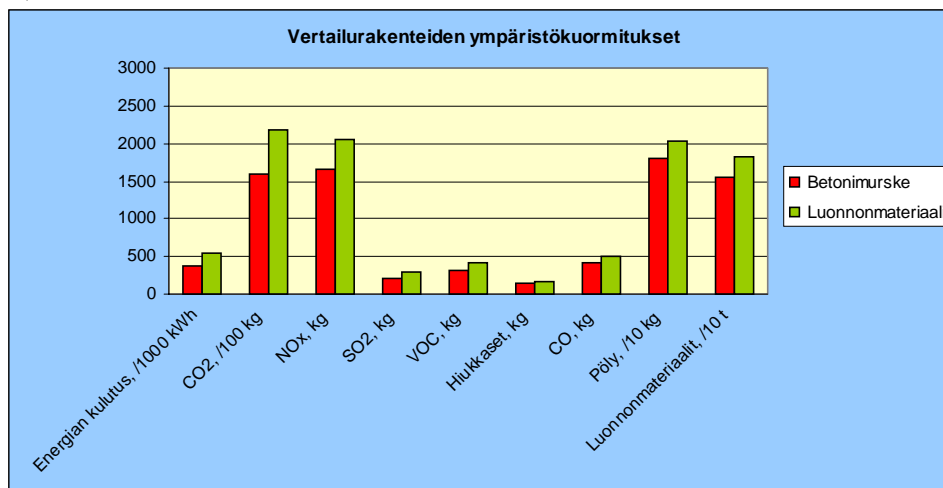
Kuva 14. Yhteenveto kohteen 3 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten pisteytyksestä.



Kuva 15. Kohteen 3 rakennevaihtoehdoista liukenevat haitta-aineet verrattuna VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallitun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m²) kohti sadan vuoden aikana.

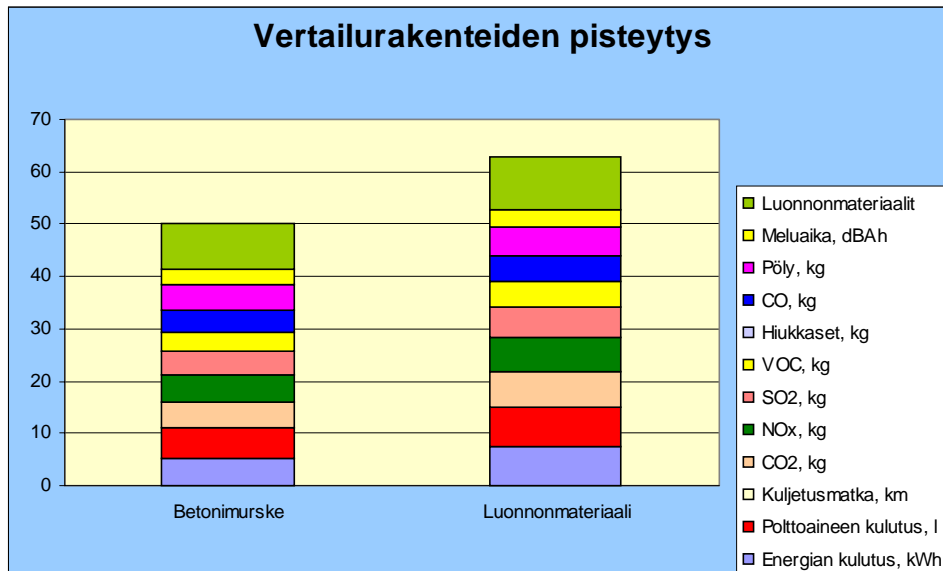
4.2.4 Kohde 4

Kohteen 4 eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten välillä oli jonkin verran eroja ja erot kohteessa aiheutuivat todennäköisesti murskeen louhinnasta (kuva 16).

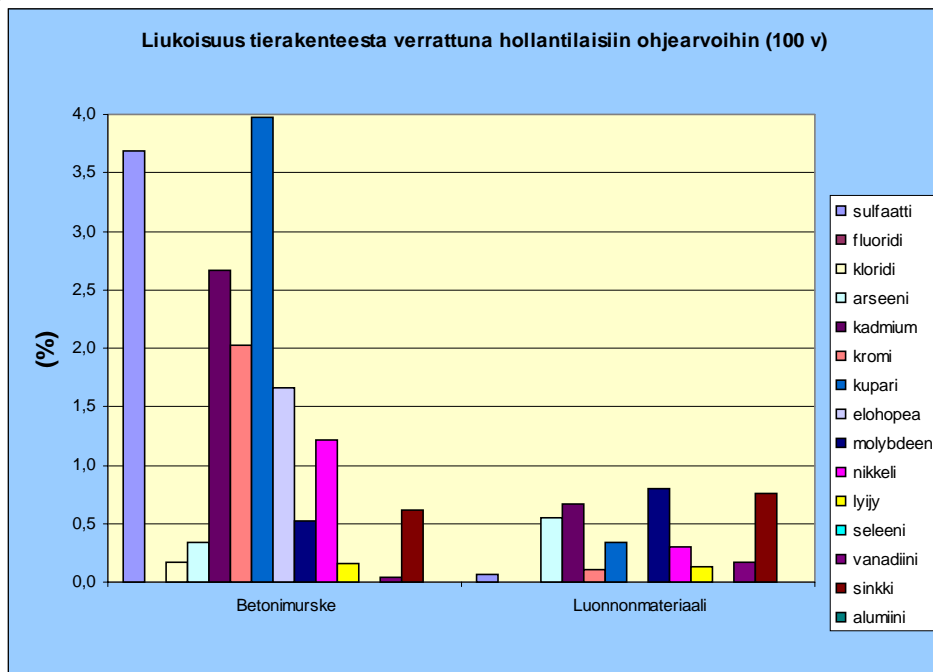


Kuva 16. Yhteenveto kohteen 4 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksista.

Pisteytyksessä, jossa betonimurskevaihtoehdon suhteutettuja ympäristökuormituksia verrattiin vertailurakenteena käytettävän luonnonmateriaalirakenteen ympäristökuormitukseen erottui lievästi luonnonmateriaalien käytön merkittävyys kuormitustekijänä (kuva 17). Molemmista rakenteista liukenevien aineiden määrät alittavat käytetyt ohjearvotasot 100 vuoden aikana, mutta betonimurskerakenteesta liukeni jonkin verran sulfaattia, kadmiumia ja kuparia (kuva 18).



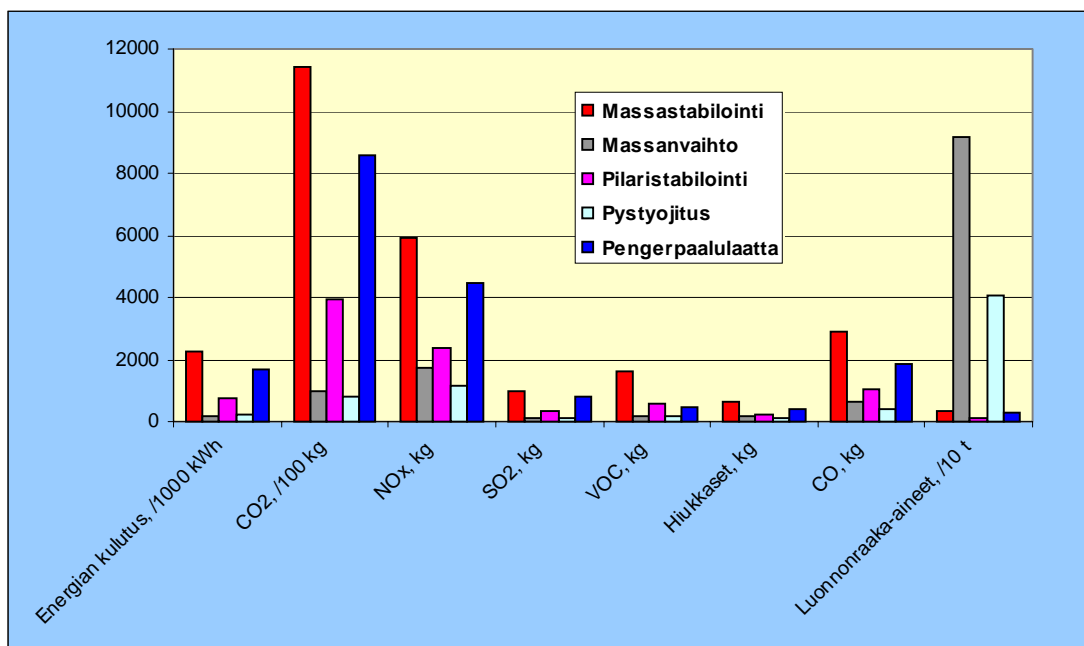
Kuva 17. Yhteenveto kohteen 4 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten pisteytyksestä



Kuva 18. Kohteen 4 rakennevaihtoehdoista liukenevat haitta-aineet verrattuna VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämään suurimpaan sallittuun liukenevaan määrään neliometriä (mg/m²) kohti sadan vuoden aikana.

4.2.5 Kohde 5

Kohteen 5 eri pohjarakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksissa oli joidenkin ympäristökuormitustekijöiden kohdalla melko merkittäviäkin eroja. Käytetyn sementin huomattava vaikutus lisäsi massa- ja pilaristabiloinnin sekä pengerpaalu-laattarakenteen ympäristökuormituksia, esimerkiksi energiankulutuksen ja polttoaineen kulutuksen osalta. Polttoaineen kulutus, joka muodostaa suuren osan energiankulutuksesta, jakautui suunnilleen samoin tavoin kuin energiankulutus. Myös muut päästöt, jotka joitakin prosessipäästöjä lukuun ottamatta ovat yleensä peräisin polttoaineiden käytöstä, olivat merkittävämpiä juuri massa- ja pilaristabiloinnissa sekä pengerpaalu-laattarakenteessa. Sen sijaan massanvaihdon ja pystyöjituksen luonnonmateriaalien kulutus oli huomattavasti muiden vaihtoehtojen kulutusta suurempi.



Kuva 19. Yhteenveto kohteen 5 pohjarakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksista.

4.3 Tulosten arviointi

Päällysrakennevaihtoehtoja kohdekohtaisesti verrattaessa voidaan havaita, että eri vaihtoehtojen välillä on eroja ympäristökuormituksissa, mutta nämä erot eivät yleensä ole kovin suuria. Kohteissa 1 ja 4 eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksissa eroja esiintyy jonkin verran. Suurin ero on havaittavissa luonnonkiviainesrakenteen kiven louhinnan ja murskauksen aiheuttamina suurempina pölypäästöinä. Toisaalta pölypäästöistä ei ole riittävästi tietoaineistoa saatavilla, joten tulosten täysin luotettava tulkinta ei ole mahdollista. Kohteen 2 ympäristökuormitusten laskennassa jouduttiin ohjelman sisältämien rajoitusten vuoksi yksinkertaistamaan alkuperäisiä rakenteita, joten tulokset eivät ehkä täysin kuvaa

todellista tilannetta. Kohteessa 3 rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten erot aiheutunevat suurelta osin lentotuhkarakenteessa käytettävän sementin valmistuksesta.

Erot esimerkkikohteen pohjarakenteiden ympäristökuormituksissa aiheutuvat suurelta osin sementin käytöstä, minkä vuoksi energian kulutus ja polttoaineen käyttö sekä niistä peräisin olevat muut päästöt ovat suurempia juuri suurina sementtimääriä käyttävissä rakennevaihtoehdoissa, kuten stabiloinneissa ja pengerraalulaatasissa. Sen sijaan luonnonmateriaalien käyttö näissä rakennevaihtoehdoissa on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi massanvaihdossa ja pystyojituksessa.

Laskentaohjelman avulla lasketut rakennekohtaiset liukoisuudet alittivat kaikissa kohteissa VTT:n materiaalien sijoitusohjearvojen perustana käyttämät sadan vuoden aikana suurimmat sallitut liukenevat määrät. Tuloksia tulisi kuitenkin käyttää vain suuntaa-antavina, sillä luotettava liukoisuuksien arviointi edellyttää aina laajoja ja kattavia materiaalikohtaisia liukoisuustutkimuksia. Lisäksi joidenkin materiaalien ja aineiden liukoisuustuloksia on edelleen suhteellisen vähän saatavilla. Myös materiaalikohtainen koostumuksen vaihtelu tulee ottaa liukoisuuden arvioinnissa huomioon.

Esimerkkikohteiden eri rakennevaihtoehtojen ympäristökuormitusten laskennan ensisijaisena tavoitteena oli testata laskenta- ja vertailuohjelman toimivuutta ja käytettävyyttä. Esimerkkikohteiden ympäristökuormitusten laskenta laskentaohjelman avulla osoittautui suhteellisen yksinkertaiseksi ja nopeaksi toimenpiteeksi. Rakennekohtaisten tulosten siirtäminen vertailuohjelmaan mahdollisti melko vaivattoman eri vaihtoehtojen kohdekohtaisen vertailun ja tulosten esittämisen. Valmiit tuloskuvat vaativat kuitenkin tuloksista riippuen yleensä pientä muotoilua.

Laskentaohjelman tulosten tulkinnessa tulee kuitenkin välttää yleistyksiä sekä tiedostaa laskentamenettelyn rajaukset ja lähtötietojen suuri vaikutus laskennan lopputuloksiin. Muiden kuin tavanomaisten rakenteiden laskennassa myös lähtötietojen yksinkertaistamisen vaikutukset tulee ottaa huomioon.

5. Yhteenveto

Tutkimuksessa luotu Excel-pohjainen laskentaohjelma soveltuu erilaisten maarakentamisessa käytettävien päälly- ja pohjarakenteiden ympäristökuormitusten rutiinomaiseen laskentaan. Ohjelma sisältää yleisimmät maarakentamisessa käytettävät materiaalit ja rakenteet ja sitä voidaan tarvittaessa myös laajentaa uusilla materiaaleilla, rakenneosilla tai rakennevaihtoehdoilla. Lisäksi eri tien päällysrakenteiden vertailua varten ohjelmaa on laajennettu erillisellä vertailun mahdollistavalla laskentataulukolla. Vertailuohjelmassa tarkasteltavia rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksia voidaan vertailla sellaisenaan, suhteutettuina tai pisteytettyinä. Ohjelma sisältää myös useita valmiita graafisia malliesityksiä.

Laskentaohjelman tulosten tulkinnassa tulee välttää yleistyksiä sekä tiedostaa laskentamenettelyn rajaukset ja lähtötietojen suuri vaikutus laskennan lopputuloksiin. Ympäristökuormitusten laskenta perustuu keskimääräisiin tietoihin, jotka yksittäistapauksissa saattavat olla liian epätarkkoja. Laskentaan liitettävä työkoneiden, työaikojen, kustannusten sekä päästötietojen kohdekohtainen valinta saattaisi jatkossa parantaa kohdekohtaisten arviointien tarkkuutta.

Liukoisuustulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon, että luotettava liukoisuuskien arviointi edellyttää aina kattavia, myös koostumusvaihtelut huomioon ottavia materiaaliikohtaisia liukoisuustutkimuksia. Lisäksi joidenkin materiaalien ja aineiden osalta liukoisuustuloksia on edelleen suhteellisen vähän saatavilla. Tulevaisuudessa tarkasteluun tulisi ottaa mukaan myös sementistä ja asfaltista liukenevat aineet, joista ei kuitenkaan vielä tällä hetkellä löydy riittävästi tietoa.

Luonnon kiviainesten liukoisuudet osoittautuivat saatujen liukoisuustestitulosten perusteella varsin pieniksi. Luonnon kiviaineksista on kuitenkin yleisesti erittäin vähän liukoisuustietoja saatavilla, joten tulosten edustavuutta on vaikea arvioida. Esimerkiksi eri aineiden esiintymisen alueelliset erot voivat aiheuttaa merkittäviäkin eroja luonnon kiviainesten liukoisuuksiin.

Maan käytön yhtenäisten arviointikriteerien määrittäminen on ongelmallista, sillä maan käytön seurauksia ei yleensä tunneta tarkasti ja sekä vaikutukset että kesto ovat usein paikallisesti ja kohdekohtaisesti määräytyviä. Lisäksi yleisiä, maarakenteiden elinkaariarviointiin soveltuvia maan käytön arviointimenetelmiä ei ole vielä kehitetty. Maan käyttö on kuitenkin maarakenteiden elinkaariarviointiin oleellisesti kuuluva ympäristökuormitus ja esimerkiksi luonnonmateriaalien hankinnan osalta vaikutuksiltaan niin merkittävä, että sitä tulisi voida arvioida. Tulevaisuudessa maan käytön arviointikriteerit voisivatkin perustua esimerkiksi portaitaiseen pisteytykseen tai materiaaliikohtaisen maankäyttöpinta-alan tarkasteluun. Luonnonmateriaalien maanottoalueen kriteerien määrittelyssä tulee kuitenkin ottaa huomioon, että osa luonnonmateriaalien hankintatoiminnasta tapahtuu kaavoituksen osoittamilla alueilla ja osa tierakentamisen yhteydessä suoraan tielinjan alle jäävältä alueelta. Soveltuvien ja yleisesti hyväksyttävien arviointikriteerien määrittely vaatii vielä huomattavasti jatkokehittelyä ja laajaa yleistä keskustelua tarvittavista kriteereistä ja niiden periaatteista.

Lähdeluettelo

- Aalbers, Th. G. et al. 1993. RIVM-rapport no 771402006.
- Eskola, P., Mroueh, U.-M., Juvankoski, M. & Ruotoistenmäki, A. 1999. Maarakentamisen elinkaariarviointi. VTT Tiedotteita 1962. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 111 s. + liitt. 16 s.
- Heijungs, R. et al. 1992. Environmental life cycle assessment of products. Guides and backgrounds. CML, Leiden University. Leiden. 130 s. + 100 s.
- Ilnicki, P. 1994. Evaluation of agricultural landscapes in the Poznan region of Poland. J. Environ. Management. 41, s. 375 - 383.
- Knöpfel, I. 1996. Framework for environmental impact assessment of long distance energy transport systems. Energy (Oxford) v 21 n 7-8 Jul-Aug 693-702.
- Kälvesten, E. 1996. Miljömässig karakterisering av vägbyggnadsmaterial. Examensarbete. Linköpings Tekniska Högskola. Linköping. 18 s. + liitt.
- Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Mäkelä, E., Walavaara, M. & Vahanne, P. 1999. Teollisuusjätteiden kaatopaikkakelpoisuus (luonnos 9.11.99).
- Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. 1996a. Mineraalisen rakennusjätteen kierrätys - Mineraalisen rakennusjätteen laadunvarmistusjärjestelmä. VTT Kemiantekniikka. Julkaisematon.
- Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. 1996b. Standardoidut liukoisuusmenetelmät maarakentamisessa hyötykäytettävien materiaalien ympäristötestauksessa. VTT Tiedotteita 1801. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 44 s. + liitt. 16 s.
- Walpole, S.C. 1994. Estimation of regional, local and site-specific profitability of soil conservation for the wheat-sheep zone of New South Wales, Australia. J. Environ. Management 41, s. 349 - 364.

Muut tietolähteet

- Betoni-Tekra Oy 1999. Olli-Heikki Pietikäinen. Kirjallinen tiedonanto 13.1.1999.
- Elg-Yhtiöt 1998. Jukka Elg. Suullinen tiedonanto 3.11.1998.
- Eskola, P. Työkoneiden käyttöaikojen, energian- ja polttoaineen kulutuksen ja päästöjen laskeminen. Muistio 5.6.1998 (julkaisematon).
- Häkkinen, T. 1994. Environmental impact of building materials. VTT Research Notes 1590. Espoo. The Technical Research Centre of Finland. 38 s.
- Häkkinen T. & Mäkelä, K. 1996. Environmental adaptation of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. VTT Research Notes 1752. Espoo. The Technical Research Centre of Finland. 61 s + liitt. 32 s.
- JJ-Asfaltti Oy 1999. Juha Karvonen. Kirjallinen tiedonanto 29.1.1999.
- Junttan Oy 1998. Ari Sohlman. Kirjallinen tiedonanto 28.12.1998.
- Kalottikone Oy 1998. Jukka Karvonen. Kirjallinen tiedonanto 29.10.1998.
- Lohja Rudus Oy. Kostiainen. Suullinen tiedonanto 15.1.1999.
- SKJ-Yhtiöt 1998. Marko Mäkikyrö. Kirjallinen tiedonanto 17.12.1998.
- SKJ-Yhtiöt 1999. Marko Mäkikyrö. Kirjallinen tiedonanto 15.3.1999.
- SYKE 1999. Jari Rintala. Kirjallinen tiedonanto 1.3.1999.
- Tielaitos 1998. Mikko Eerola. Kirjallisen tiedonannot 9.11.1998 ja 22.12.1998.
- Tielaitos 1998. Keimo Komulainen. Suullinen tiedonanto 16.9.1998
- Tielaitos 1998. Mats Reihe. Suullinen tiedonanto 14.10.1998
- Tielaitos 1998. Veli-Matti Uotinen. Kirjalliset tiedonannot: 19.12.1998 ja 13.1.1999.
- Tielaitos 1994. Asfalttiasemien ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelu 1994.
- Tielaitos 1997. Päällysteiden suunnittelu.
- Valtatie Oy 1998. Timo Mannonen. Kirjallinen tiedonanto: 23.10.1998.
- VTT Kemiantekniikka 1998. Torsti Siltanen. Kirjallinen ja suullinen tiedonanto 17.12.1998.
- VTT Rakennustekniikka 1998. Laura Apilo. Kirjallinen tiedonanto 21.9.1998 ja suullinen tiedonanto 24.9.1998.

LIITE 1**Tutkimuksessa ja laskentaohjelmassa käytetyt päätielähteet eri toimintavaiheissa ja raaka-aineissa**

Toimintavaihe	Tietolähde
Lentotuhkan varastointi ja lastaus	Helsingin Energia (Oasmaa 1996)
Lentotuhkan kuljetukset ja sijoitus maarakenteisiin	Lohja Rudus (Rämö 1997)
Lentotuhkan sijoitus kaatopaikalle	Helsingin Energia (Oasmaa 1996) Blomster 1989 Markkanen 1996 Arovaara 1996
Kallion louhinta	Lemminkäinen (Ruosteoja 1996)
Hiekan ja soran otto	Lohja Rudus (Rasimus 1996)
Kiviainesten murskaus	Lemminkäinen (Ruosteoja 1996) Tielaitos 1994 ja 1995
Kiviainesten kuljetukset	Lohja Rudus (Rasimus 1998)
Tienrakennus	RIL 156 1995 Tielaitos (Uotinen 1998)
Masuunikuona	Rautaruukki (Mäkikyrö 1998 ja 1999)
Betonimurske	Lohja Rudus (Määttänen 1998)
Sementti	Häkkinen ja Mäkelä 1996 Finnsement (Lundström 1998)
Asfaltti	Häkkinen ja Mäkelä 1996 IVL (Stripple 1995) Asfalttinormit 1995 Tielaitos 1998 (Uotinen ja Reihe 1998)
Betoni	Häkkinen ja Mäkelä 1996 Lohja Rudus Oy (Kostiainen 1999)
Kalkki	Häkkinen ja Mäkelä 1996
Sahatavara	Häkkinen 1994
Raudoitusteräs	Häkkinen ja Mäkelä 1996
Uudelleenpäällystys	Tielaitos (Komulainen 1998)
Remixer	Tielaitos (Eerola, M. 1998) Päällysteiden suunnittelu / Tielaitos 1997 Elg-Yhtiöt (Elg 1998) JJ-Asfaltti oY (Karvonen 1999) Kalottikone Oy (Karvonen 1998) Valtatie Oy (Mannonen 1998) VTT Kemianteekniikka (Siltanen ja Lehtomäki 1998)
Liimaus	VTT Rakennustekniikka (Apilo 1998)
Paalutus	Betoni-Tekra Oy (Pietikäinen 1999) Junttan Oy (Sohlman 1998)
Pystyjoitus	Kaitos Oy 1998 Geotechnics Holland BV 1998 Containerships 1998
Liukoisuus	VTT Kemianteekniikka (Wahlström <i>et al.</i> 1999)

LIITE 2

Laskentaohjelman syöttölomakkeet

PÄÄLLYSRAKENTEIDEN PÄÄSTÖT - SYÖTTÖLOMAKE

Käyttäjää täyttää keltaisella merkityille alueille

Anna lähtötiedot

Rakenteen nimi:	Testi
Tunnistamateriaali:	LT
Rakenteen pituus, m	1000
Rakenteen leveys, m	12
Päällysteen leveys, m	10

Vertailun nro:

1

Anna rakennetiedot

Rakenne	Koodi (A-H)	Paksuus, m	Materiaali
Päällyste 1 (ensisijainen päälli)	b	0,05	AB 16
Päällyste 2	a	0	AB 20
Päällyste 3	a	0	AB 20
Kantava kerros	d	0,15	BST
Jakava kerros	e	0,65	LT + YSE a %
Suodatinkerros	a	0,2	Hiekka
Pengertäytekerros	a	0,5	Hiekka hl

Valitse rakennemateriaalikoodi --->

A	B	C	D	E	F	G	H
AB 20	AB 16	SMA	:	:	:	:	:
AB 20	AB 16	SMA	ABK	:	:	:	:
AB 20	AB 16		ABK	:	:	:	:
Murske	Kuonamurske	Betonimurske	BST	:	:	:	:
Sora	Masuunihiekka	Betonimurske	LT	LT + YSE a %	Murske	Kappalekuona	Kuonamurske
Hiekka	Masuunihiekka	:	:	:	:	:	:
Hiekka hl	Murske	:	:	:	:	:	:

Tarvittaessa anna sementin osuus a

Sementin määrä rakennosassa, %	2
--------------------------------	---

Liukoisuuden tarkastelu-aika

100 vuotta

Anna kuljetusetaisyys

Materiaali	Kuljetusetaisyys, km	
	Maaseutu	Taajama
AB 16	10	0
Ei rakennekerrosta	0	0
Ei rakennekerrosta	0	0
BST	50	0
LT + YSE a %	40	0
Hiekka	1,3	0
Hiekka hl	15	0

Anna kuljetusetaisyys läjitykseen

Materiaali	Kuljetusetaisyys, km	
	Maaseutu	Taajama
BST	0	0
LT + YSE a %	30	15
Ei läjitystä hiekalle	0	0

Tien kunnostus elinkaaritarkastelujakson aikana

	Uudelleenpäällystys	Remixer	Esilämmitystapa
Massanlisäys, kg/m ²	0	0	
Toimenpiteiden lukumäärä	0	0	
Asfaltin kuljetus maaseudulla, km	0	0	
Asfaltin kuljetus taajamassa, km	0	0	
Esilämmitystapa		n	Kaasu
Liimausten lukumäärä	0		

N M O

Kaasu	Polttoöljy	
-------	------------	--

POHJARAKENTEIDEN PÄÄSTÖT - SYÖTTÖLOMAKKEET A, B ja C

Käyttäjää täyttää taulukoiden A-C keltaisilla merkityt alueet sekä VAIHTOEHTOISESTI taulukon A tai B vihreillä merkityille alueille

Tie:	Testi 1
Vertailun nro:	1

A. Valitse haluamasi pohjarakenteet ja anna lähtötiedot

Rakenne	Tien pituus m	Tien leveys m	Pehmeikön syvyys m	Tiepenkereen kokonaispaksuus m	Muut kerrokset m	Pilari/paalu koko m	k/k m	Sementtiä kg/m ³	Kalkkia kg/m ³
Massastabilointi	0	0	0	0				75	75
Massanvaihto	0	0	0	0					
Pilaristabilointi	0	0	0	0		0,8	1,5	75	75
Pystyjoitus	100	10	0	0	0,5		1		
Pengerpaalulaatta	100	10	0	3		0,3	0		

C. Anna kuljetustapa ja -etaisyys

Pohjarakenne	Kuljetusetaisyys, km	
	maaseutu	taajama
Massastabilointi		
Sementin kuljetus	0	0
Massanvaihto		
Materiaalin poisto	20	0
Raaka-aineen kuljetus	0	0
Pilaristabilointi		
Sementin kuljetus	0	0
Pystyjoitus		
Ojanauhojen kuljetus	0	0
Raaka-aineen kuljetus	0	0
Pengerpaalulaatta		
Paalusementin kuljetus	0	0
Paalujen kuljetus	0	0

B. Valitse haluamasi pohjarakenteet ja anna pyydyt lähtötiedot

Massastabilointi:	Rakennetilavuus, m ³ rtr	0
Massanvaihto:	Rakennetilavuus, m ³ rtr	0
Pilaristabilointi:	Pilarien kok.pituus, m	0
Pystyjoitus:	Ojen kok.pituus, m	0
Pengerpaalulaatta:	Kok.paalupituus, m	1000
	Laatan pinta-ala, m ²	0

Käytä tarvittaessa oletettua kuljetusetaisyyttä

taajama	10
maaseutu	50
työmaalta	0

LIITE 3

Laskentaohjelman tulostelomakkeet

PÄÄLLYSRAKENTEEN PÄÄSTÖT - TULOSLOMAKE				Graafinen tuloste ----->			
Tierakenteen nimi:	Testi						
Vertailun nro:	1						
Rakenneosa	Materiaali	Paksuus, m	L/S-suhde, l/kg (50v)	Raaka-aineiden käyttö rakentamisen aikana			
Päällyste1	AB 16	0,05	5,1	Sivutuotteet	Luonnonmateriaalit	Sementti	
Päällyste2	AB 20	0	sis. ed.	0	1110	0	
Päällyste3	AB 20	0	sis. ed.	sis. ed.	sis. ed.	sis. ed.	
KK	BST	0,15	1,8	sis. ed.	sis. ed.	sis. ed.	
JK	LT + YSE a %	0,65	0,6	0	3982	0	
SK	Hiekka	0,2	1,5	12205	0	256	
Penger	Hiekka hi	0,5	0,6	0	5880	0	
				0	15750	0	
				12205	26722	256	Yhteensä
Tierakenteen päästöt tierakennetta kohti	Materiaalin tuotanto	Kuljetus	Sijoitus rakenteeseen	Rakentaminen yhteensä	Tien kunnostus	Yhteensä	
Energian kulutus, kWh	1289 922	151 689	11 427	1 453 038	0	1 453 038	
Polttoaineen kulutus, l	80 873	15 048	4 767	100 689	0	100 689	
Kuljetusmatka, km		42 996		42 996	0	42 996	
CO ₂ , kg	536 024	39 857	13 010	588 891	0	588 891	
NO _x , kg	3 032	516	201	3 749	0	3 749	
SO ₂ , kg	644	7	13	664	0	664	
VOC, kg	825	73	21	918	0	918	
Hiukkaset, kg	262	56	16	334	0	334	
CO, kg	698	211	59	968	0	968	
Pöly, kg	974	1 552	0	2 526	0	2 526	
Melu aika, dBAh	15 839	81 624	24 473	121 935	0	121 935	
Tierakenteen päästöt tierakennetta kohti ilman päällysteitä	Materiaalin tuotanto	Kuljetus	Sijoitus rakenteeseen	Rakentaminen yhteensä	Graafinen tuloste ilman päällysteitä ----->		
Energian kulutus, kWh	1 060 069	146 162	11 427	1 217 658			
Polttoaineen kulutus, l	71 210	14 500	4 397	90 107			
Kuljetusmatka, km		41 429		41 429			
CO ₂ , kg	458 267	38 405	11 969	508 640			
NO _x , kg	2 548	497	192	3 237			
SO ₂ , kg	525	7	13	545			
VOC, kg	667	70	20	757			
Hiukkaset, kg	223	54	16	292			
CO, kg	661	203	58	922			
Pöly, kg	974	1 495	0	2 469			
Melu aika, dBAh	15 839	81 624	24 473	121 935			
Liukoisuus tierakennetta kohti	Liukoisuus (100 v), mg/kg	Aine	Liukoisuus / holl. ohjearvot (100 v), %	Huom!	Holl. ohjearvot (100 v), mg/m ²		
	1008,1	sulfaatti	7		4 500 000		
	1,0	fluoridi	2		14 000		
	20,4	kloridi	0		3 000 000		
	0,1	arseni	4		435		
	0,0	kadmium	3		12		
	1,2	kromi	25		1 500		
	0,0	kupari	1		540		
	0,0	elohopea	1		5		
	0,9	molybdeeni	26		1 140		
	0,0	nikkeli	1		525		
	0,0	lyijy	0		1 275		
	0,1	seleeni	300	ohjearvon ylitys	15		
	0,2	vanadiini	2		2 400		
	0,1	sinkki	1		2 100		
	1,6	alumiini			puuttuu		
Läijityksen ympäristökuormitukset	BST	LT + YSE a %	Ei läijitystä hiekalle	Yhteensä			
Kuljetus	KK	JK	SK				
Energian kulutus, kWh	0	128 187	0	128 187			
Polttoaineen kulutus, l	0	12 717	0	12 717			
Kuljetusmatka, km	0	32 889	0	32 889			
CO ₂ , kg	0	33 788	0	33 788			
NO _x , kg	0	417	0	417			
SO ₂ , kg	0	6	0	6			
VOC, kg	0	78	0	78			
Hiukkaset, kg	0	47	0	47			
CO, kg	0	228	0	228			

POHJARAKENTEIDEN PÄÄSTÖT - TULOSLOMAKE

Graafinen tuloste ----->

Tie:	Testi 1
Vertailun nro:	1

	Massastabilointi	Massanvaihto	Pilaristabilointi	Pystyjoitus	Pengerpaalulaatta	Tie yhteensä
Rakennetiedot						
Pituus, m	0	0	0	100	100	200
Leveys, m	0	0	0	10	10	20
Pehmeikön syvyys, m	0	0	0	0	0	0
Valittujen pohjarakennevaihtoehtojen päästöt						
Energian kulutus, kWh	0	0	0	4 964	478 124	483 088
<i>polttoaineen kulutus, l</i>	0	0	0	1 433	39 608	41 041
Kuljetusmatka, km	0	0	0	0	0	0
CO2, kg	0	0	0	3 902	237 790	241 692
NOx, kg	0	0	0	72	1 227	1 300
SO2, kg	0	0	0	5	218	223
VOC, kg	0	0	0	8	111	120
Hiukkaset, kg	0	0	0	7	113	119
CO, kg	0	0	0	25	530	555
Pöly, kg	0	0	0	351	0	351
Meluaika, dBAh	0	0	0	10 032	3 656	13 688
Pohjarakenteissa käytetyt raaka-aineet						
Hiekka, t	0	0	0	6 000	791	6 791
Hiekkamoreeni, t	0	0	0	0	0	0
Murske, t					339	339
Betoni, t					1 382	1 382
Sementti, t	0	0	0	0	202	202
<i>kalkkikivi, t</i>	0	0	0	0	0	0
<i>savi, t</i>	0	0	0	0	0	0
Kalkki, t	0	0	0	0	0	0
Polypropeeni, t	0	0	0	0	0	0
Sahatavara, t					2	2
Teräs, t					35	35
Σ Luonnonraaka-aineet*	0	0	0	6 000	791	6 791
Läjitys						
materiaalimäärä, t	0	0	0	0	0	0

Tulostus - Päälysrakenneosa

Rakenneosakohtaiset tiedot	<ul style="list-style-type: none"> • tierakenteen nimi • materiaalin nimi • rakenneosat mitat, m • teoreettinen rakennetilavuus, m³rtr • massa rakenteessa, t
Rakenneosakohtaiset päästöt vaiheittain: <ul style="list-style-type: none"> - energian kulutus, kWh (polttoaineen kulutus, l) - kuljetusmatka, km - CO₂, kg - NO_x, kg - SO₂, kg - VOC, kg - hiukkaset, kg - CO, kg - pöly, kg - meluaika, dBAh 	<ul style="list-style-type: none"> • materiaalin tuotanto • materiaalin kuljetus • materiaalin sijoitus rakenteeseen • tienrakentaminen yhteensä • päällysteet: tien kunnostus
Liukoisuus päällysrakenneosasta sadan vuoden aikana	<ul style="list-style-type: none"> • sulfaatti, fluoridi, kloridi, arseeni, kadmium, kromi, kupari, elohopea, molybdeeni, nikkeli, lyijy, seleeni, vanadiini, sinkki, alumiini • liukoisuus, mg/kg ja mg/m² • hollantilaiset ohjearvot sadalle vuodelle
B. Graafinen tuloste	
Haitta-ainekohtainen liukoisuus	<ul style="list-style-type: none"> • rakenneosittainen palkkidiagrammi

Tulostus - Päälysrakenne

A. Taulukkomuotoinen tuloste	
Tiedot päälysrakenteesta	<ul style="list-style-type: none"> • rakenteen nimi • vertailun tunnistenumero • rakenneosat ja –materiaalit • rakenneosien paksuudet, m • rakenteen läpi suotautuneen veden määrä tiettyinä ajanjaksona eli L/S-suhde, l/kg
Päälysrakenteen päästöt vaiheittain sekä päälystetylle että päälystämättömälle päälysrakenteelle: <ul style="list-style-type: none"> - energian kulutus, kWh ja polttoaineen kulutus, l - kuljetusmatka, km - CO₂, kg - NO_x, kg - SO₂, kg - VOC, kg - Hiukkaset, kg - CO, kg - pöly, kg - meluaika, dBAh - raaka-aineiden käyttö (luonnon raaka-aineet, sivutuotteet ja sementti) 	<ul style="list-style-type: none"> • materiaalien tuotanto • materiaalien kuljetus • materiaalien sijoitus rakenteeseen • tienrakentaminen yhteensä • tienkunnostus • tien elinkaaren aikaiset yhteensä
Liukoisuus päälysrakenteesta sadan vuoden aikana	<ul style="list-style-type: none"> • sulfaatti, fluoridi, kloridi, arseeni, kadmium, kromi, kupari, elohopea, molybdeeni, nikkeli, lyijy, seleeni, vanadiini, sinkki, alumiini • liukoisuus, mg/kg ja mg/m² • osuus hollantilaisista sadan vuoden ohjearvoista, %
Sivutuotteiden läjityksen kuljetuksen päästöihin perustuvat ympäristökuormitukset	<ul style="list-style-type: none"> • kuljetuksen ympäristökuormitukset päälysrakenneosittain • läjitettävä massamäärä, m³
B. Graafinen tuloste	
Ympäristökuormituskohtainen tarkastelu	<ul style="list-style-type: none"> • työvaiheittainen pylväsdiagrammi päälystetylle ja päälystämättömälle rakenteelle • työvaiheittainen ympyrädiagrammi päälystetylle ja päälystämättömälle rakenteelle
Päälysrakenteen kokonaiskuormitukset	<ul style="list-style-type: none"> • yhteenveto pylväsdiagrammi päälystetystä ja päälystämättömästä rakenteesta • pylväsdiagrammi päälystetylle ja päälystämättömälle rakenteelle

Tulostus - Pohjarakenne

A. Taulukkomuotoinen tuloste	
Perustiedot	<ul style="list-style-type: none"> • rakenteen nimi • vertailun tunnistenumero • rakenteen/tieosan pituus, m • rakenteen/tieosan leveys, m • rakenteen/tieosan syvyys, m
Pohjarakenteiden rakentamisen aikaiset päästöt: <ul style="list-style-type: none"> - energian kulutus, kWh ja polttoaineen kulutus, l tai l/t - kuljetusmatka, km - CO₂, kg - NO_x, kg - SO₂, kg - VOC, kg - Hiukkaset, kg - CO, kg - pöly, kg - meluaika, dBAh 	<ul style="list-style-type: none"> • massastabilointi • massanvaihto • syvästabilointi • pystyjoitus • pengerraalulaatta
Pohjarakenteissa käytetyt raaka-aineet:	<ul style="list-style-type: none"> • hiekka, t • hiekkamoreeni, t • murske, t • betoni, t • sementti / kalkkikivi ja savi, t • kalkki, t • polypropeeni, t • teräs, t • luonnonraaka-aineet yhteensä, t
Läjitys	<ul style="list-style-type: none"> • materiaalmäärä, t
B. Graafinen tuloste	
Ympäristökuormituskohtaiset päästöt rakennetyypeittäin	<ul style="list-style-type: none"> • pylväsdiagrammi

LIITE 5

Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 1

Päällystetyn tierakenteen päästöt			
KOHDE 1	Luonnonmateriaali	Masuunikuona	Betonimurske
Energian kulutus, /1000 kWh	2 100	1 900	2 400
CO2, /1000 kg	800	660	840
NOx, /10 kg	710	450	680
SO2, kg	1 100	960	1 000
VOC, kg	1 500	1 200	1 600
Hiukkaset, kg	580	370	600
CO, kg	1 400	530	1 400
Pöly, /10 kg	6 000	30	590
Luonnonmateriaalit, /100 t	550	90	90

Liukoisuus (100 v.)				
KOHDE 1	Hollant. ohjearvot (100 v.)	Luonnonmateriaali	Masuunikuona	Betonimurske
Sulfaatti, mg/m²	4 500 000	4 700	2 000 000	640 000
Fluoridi, mg/m²	14 000	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Kloridi, mg/m²	3 000 000	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu	19 000
Arseeni, mg/m²	435	4	5	4
Kadmium, mg/m²	12	0,1	0,3	1
Kromi, mg/m²	1 500	2	3	120
Kupari, mg/m²	540	3	3	80
Elohopea, mg/m²	5	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu	0,3
Molybdeeni, mg/m²	1 140	14	6	14
Nikkeli, mg/m²	525	2	4	23
Lyijy, mg/m²	1 275	2	4	7
Seleeni, mg/m²	15	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Vanadiini, mg/m²	2 400	6	49	0
Sinkki, mg/m²	2 100	24	13	35
Alumiini, mg/m²	-	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu	1 500

Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 2

Päällystetyn tierakenteen päästöt		
KOHDE 2	BST	ABK
Energian kulutus, /100 kWh	800	510
CO ₂ , /100 kg	290	180
NO _x , kg	200	160
SO ₂ , kg	40	20
VOC, kg	50	30
Hiukkaset, kg	20	10
CO, kg	30	30
Pöly, kg	130	650
Luonnonmateriaalit, /10 t	270	230

Liukoisuus (100 v.)			
KOHDE 2	Hollant. ohjearvot (100 v.)	BST	ABK
Sulfaatti, mg/m ²	4 500 000	1 800	5 000
Fluoridi, mg/m ²	14 000	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Kloridi, mg/m ²	3 000 000	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Arseeni, mg/m ²	435	1	3
Kadmium, mg/m ²	12	0,02	0,1
Kromi, mg/m ²	1 500	0,4	2
Kupari, mg/m ²	540	1	3
Elohopea, mg/m ²	5	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Molybdeeni, mg/m ²	1 140	2	10
Nikkeli, mg/m ²	525	0,4	2
Lyijy, mg/m ²	1 275	0,4	2
Seleeni, mg/m ²	15	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Vanadiini, mg/m ²	2 400	1	5
Sinkki, mg/m ²	2 100	4	20
Alumiini, mg/m ²	-	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu

Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 3

Päällystetyn tierakenteen päästöt		
KOHDE 3	LT + YSE 6%	Luonnonmateriaali
Energian kulutus, /100 kWh	1 300	480
CO ₂ , /100 kg	580	190
NO _x , kg	330	190
SO ₂ , kg	60	20
VOC, kg	90	40
Hiukkaset, kg	30	20
CO, kg	110	40
Pöly, /10 kg	20	170
Luonnonmateriaalit, /10 t	100	210

Liukoisuus (100 v.)			
KOHDE 3	Hollant. ohjearvot (100 v.)	LT + YSE 6%	Luonnonmateriaali
Sulfaatti, mg/m ²	4 500 000	460 000	17 000
Fluoridi, mg/m ²	14 000	450	Tietoaineisto puuttuu
Kloridi, mg/m ²	3 000 000	9 500	Tietoaineisto puuttuu
Arseeni, mg/m ²	435	23	4,5
Kadmium, mg/m ²	12	0,4	0,15
Kromi, mg/m ²	1 500	550	3
Kupari, mg/m ²	540	4	3
Elohopea, mg/m ²	5	0,1	Tietoaineisto puuttuu
Molybdeeni, mg/m ²	1 140	420	20
Nikkeli, mg/m ²	525	3	3
Lyijy, mg/m ²	1 275	3	3
Seleeni, mg/m ²	15	70	Tietoaineisto puuttuu
Vanadiini, mg/m ²	2 400	70	8
Sinkki, mg/m ²	2 100	20	30
Alumiini, mg/m ²	-	730	0

Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 4

Päällystetyn tierakenteen päästöt		
KOHDE 4	Betonimurske	Luonnonmateriaali
Energian kulutus, /1 000 kWh	380	550
CO ₂ , /100 kg	1 600	2 200
NO _x , kg	1 700	2 100
SO ₂ , kg	220	300
VOC, kg	320	420
Hiukkaset, kg	140	170
CO, kg	420	500
Pöly, /10 kg	1 800	2 000
Luonnonmateriaalit, /10 t	1 500	1 800

Liukoisuus (100 v.)			
KOHDE 4	Hollant. ohjearvot (100 v.)	Betonimurske	Luonnonmateriaali
Sulfaatti, mg/m ²	4 500 000	170 000	3 100
Fluoridi, mg/m ²	14 000	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Kloridi, mg/m ²	3 000 000	5 000	Tietoaineisto puuttuu
Arseeni, mg/m ²	435	2	2
Kadmium, mg/m ²	12	0,3	0,1
Kromi, mg/m ²	1 500	30	2
Kupari, mg/m ²	540	20	2
Elohopea, mg/m ²	5	0,1	Tietoaineisto puuttuu
Molybdeeni, mg/m ²	1 140	6	9
Nikkeli, mg/m ²	525	6	2
Lyijy, mg/m ²	1 275	2	2
Seleeni, mg/m ²	15	Tietoaineisto puuttuu	Tietoaineisto puuttuu
Vanadiini, mg/m ²	2 400	1	4
Sinkki, mg/m ²	2 100	13	16
Alumiini, mg/m ²	-	360	Tietoaineisto puuttuu

LIITE 9

Ympäristölaskennan tulokset – KOHDE 5

	Massastabilointi	Massanvaihto	Pilaristabilointi	Pystyjoitus	Pengerpaalu- laatta
Rakennetiedot					
Pituus, m	300	300	300	300	300
Leveys, m	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Pehmeikön syvyys, m	6	6	6	6	9
Ympäristökuormitukset					
Energian kulutus, kWh	2 240 000	151 000	752 000	224 000	1 700 000
polttoaineen kulutus, l	204 000	36 000	66 000	29 000	141 000
Kuljetusmatka, km	4 600	11 000	1 500	45 000	5 000
CO₂, kg	1 140 000	98 000	395 000	82 300	860 000
NO_x, kg	5 900	1 800	2 400	1 200	4 600
SO₂, kg	980	110	350	90	800
VOC, kg	1 600	200	560	180	470
Hiukkaset, kg	640	160	240	120	400
CO, kg	2 900	600	1 100	400	1 900
Pöly, kg	160	400	50	4 000	170
Meluaika, dBAh	82 000	363 000	2 400	167 000	26 000
Käytetyt raaka-aineet					
Hiekka, t	-	-	-	40 500	2 800
Hiekkamoreeni, t	-	91 800	-	-	-
Murske, t	-	-	-	-	1 200
Betoni, t	-	-	-	-	4 900
Sementti, t	1 400	-	450	-	720
<i>kalkkikivi, t</i>	1 700	-	540	-	-
<i>savi, t</i>	560	-	180	-	-
Kalkki, t	1 400	-	450	-	-
Polypropeeni, t	-	-	-	3	-
Sahatavara, t	-	-	-	-	5
Teräs, t	-	-	-	-	110
Σ Luonnonraaka-aineet, t	3 700	91 800	1 200	40 500	2 800
Läjitys					
Materiaalimäärä, t	-	68 900	-	-	-



Tekijä(t) Laine-Ylijoki, Jutta, Mroueh, Ulla-Maija, Wellman, Kari & Mäkelä, Esa			
Nimeke Maarakentamisen elinkaariarviointi. Ympäristövaikutusten laskentaohjelma			
Tiivistelmä Tämän " <i>Maarakentamisen elinkaariarviointi</i> " –tutkimuksen toisen vaiheen tavoitteena oli siirtää ensimmäisessä vaiheessa esitetty suositus käytännössä hyödynnettäväksi malliksi ja luoda laskentaohjelma tavallisimpien tierakenteiden elinkaarenaikaisten ympäristövaikutusten laskemiseksi ja vertailemiseksi. Lisäksi täydennettiin ensimmäisessä vaiheessa hankittuja tietoja esimerkiksi luonnonmateriaalien liukoisuuksista sekä maan käytön arvioinnista. Tutkimuksessa luotu Excel-pohjainen laskentaohjelma soveltuu erilaisten maarakentamisessa käytettävien päällys- ja pohjarakenteiden ympäristökuormitusten rutiininomaiseen laskentaan, kun maarakenteiden elinkaariarviointi toteutetaan julkaisussa " <i>Maarakentamisen elinkaariarviointi</i> " /Eskola <i>et al.</i> 1999/ esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Lähtökohtana on suunnittelijan määrittelemä tierakenne tai osa rakenteesta, johon tarvittavat materiaalit ja rakenneosien paksuudet on määritetty. Lisäksi tulee tuntea työmaalle tuotavien ja sieltä muualle kuljetettavien materiaalien kuljetusmatkat ja –tavat, materiaalin liukoisuustiedot sekä sivutuotteiden kuljetusmatkat läjitysalueelle. Laskentaohjelma sisältää yleisimmät maarakentamisen materiaalit ja rakenteet. Sitä voidaan tarvittaessa myös laajentaa uusilla materiaaleilla, rakenneosilla tai rakennevaihtoehdoilla. Lisäksi ohjelmaa on laajennettu eri tien päällysrakenteiden vertailua varten erillisellä vertailun mahdollistavalla laskentataulukolla. Vertailuohjelmassa rakennevaihtoehtojen ympäristökuormituksia voidaan vertailla sellaisenaan, suhteutettuina tai pisteytettyinä. Ohjelma sisältää useita valmiita graafisia malliesityksiä. Eri materiaalien vertailtavuuden parantamiseksi ja koko rakenteen maaperään kohdistuvien haittojen arvioimiseksi selvitetään myös muutaminen, tierakenteissa yleisten luonnonmateriaalien sekä sivutuotteista masuunihiekan liukoisuutta. Saatuja liukoisuustuloksia hyödynnettiin ympäristökuormituslaskentamenettelyn liukoisuusarvioinnin tietoaineiston täydentämisessä. Julkaisussa käsitellään myös maan käytön arviointimenetelmien nykytilannetta sekä olemassa olevaa kirjallisuutta. Mahdollisina arviointimenetelminä esitetään pisteytykseen tai materiaalikohtaisen maankäyttöpinta-alan tarkasteluun perustuvat menettelyt.			
Avainsanat road construction, life cycle analysis, modelling, calculation, environmental impacts, byproducts, transportation, emissions, energy, fuels			
Toimintayksikkö VTT Kemianteekniikka, Ympäristötekniikka, Betonimiehenkuja 5, PL 1403, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5636-4 (nid.) 951-38-5637-2 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero K8SU00400	
Julkaisuaika Tammikuu 2000	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 43 s. + liitt. 12 s.	Hinta B
Projektin nimi Maarakentamisen elinkaariarviointi		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), tielaitos, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy, Helsingin Energia, SKJ-Yhtiöt Oy, VTT Kemianteekniikka, VTT Yhdyskuntatekniikka	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



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

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2014
VTT-TIED-2014

Author(s) Laine-Ylijoki, Jutta, Mroueh, Ulla-Maija, Wellman, Kari & Mäkelä, Esa			
Title Life cycle analysis of road construction. Inventory analysis program of environmental impacts			
Abstract A two-stage study "Life Cycle Analysis of Road Construction" is part of a more extensive research project "Demonstration of the Usability of Recycled Fill". In the first stage a proposal was made for a procedure suitable for the life cycle impact assessment of road construction. In order to evaluate the applicability of the procedure, the use of coal ash, crushed concrete waste and blast-furnace slag in road construction was evaluated in case studies. Also the use of these industrial by-products and waste materials was compared with the use of natural materials in corresponding applications. The aim of this study's second stage was to transfer the assembled data for utilisation as a practical model by creating an inventory analysis program to calculate and compare the life cycle impacts of the most common pavement and sub-grade constructions. Furthermore, the data concerning, especially leaching behaviour of natural materials and land use assessment obtained in the first stage was also augmented. The Excel-based life cycle inventory analysis program for road constructions which has been developed on the basis of the study's results covers all the work stages from material production to road up-keep as well as the materials commonly used in the structural courses of road constructions. The environmental loading of the constructions and structural components made from the materials within the scope of the program can be calculated simply using only the dimensions of the construction and thicknesses of the structural courses and transport distances of raw materials as input data. If necessary the program can be extended to include new materials, structural components and alternative sub-grades. It also has a worksheet enabling the comparison of pavement structures. The environmental loadings of alternative constructions can be compared as such, in relation to fixed reference or as effect scores. The program also includes a number standard graphical presentations. To enable reliable comparisons between different constructions and to estimate the migration into the soil during the placement of the construction, the solubilities of a few of the natural mineral aggregates used in road construction and of by-products the solubility of foundry sand were tested in connection with the study. The current state of land use assessment method development and existing literature are also outlined in this report. As possible future assessment methods procedures based on effect scoring or on a weighted analysis of material-specific land use are presented.			
Keywords road construction, life cycle analysis, modelling, calculation, environmental impacts, byproducts, transportation, emissions, energy, fuels			
Activity unit VTT Chemical Technology, Environmental Technology, Betonimiehenkuja 5, P.O.Box 1403, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5636-4 (soft back ed.) 951-38-5637-2 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number K8SU00400	
Date January 2000	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 43 p. + app. 12 p.	Price B
Name of project Maarakentamisen elinkaariarviointi		Commissioned by National Technology Agency (Tekes), Finnra- the Finnish National Road Administration, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy, Helsinki Energy, SKJ-Yhtiöt Oy, VTT Chemical Technology, VTT Communities and Infrastructure	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	