

Puuraaka-aineen tuotanto elinkaarilaskennassa

**Vesa Imponen
Sari Alden
Simo Kaila
Seppo Kellomäki
Antti Korpilahti
Olavi Pennanen
Sari Pitkänen
Helena Wessman
Jouko Örn**

Puuraaka-aineen tuotanto elinkaarilaskennassa

**Vesa Imponen
Sari Alden
Simo Kaila
Seppo Kellomäki
Antti Korpilahti
Olavi Pennanen
Sari Pitkänen
Helena Wessman
Jouko Örn**

Metsätehon raportti 119
6.8.2001

Konsortiohanke: A. Ahlström Osakeyhtiö, Koskitukki Oy, Kuhmo Oy, Metsähallitus, Metsäliitto Osuuskunta, Metsäteollisuus ry, Pölkky Oy, Stora Enso Oyj, UPM-Kymmene Oyj, Vapo Timber Oy ja Visuvesi Oy

Asiasanat: elinkaariarviointi, LCA, ekotase, puuntuotanto

© Metsäteho Oy

Helsinki 2001

SISÄLLYS

ALKUSANAT	4
TIIVISTELMÄ	5
1 JOHDANTO	6
2 YKSITYISMETSIIEN ELINKAARILASKENNAN KEHITTÄMINEN.....	8
2.1 Projektin tausta.....	8
2.2 Metsätöiden päästöt Keski-Suomessa - laskentaesimerkki.....	9
2.3 Ravinnetaseen laskentakoe.....	15
2.4 Elinkaarilaskenta osana metsäsuunnittelua.....	17
2.5 Tarkastelu.....	22
3 METSIIEN KEHITYSTÄ KUVAAVA PROSESSIMALLI T&K-TYÖN VÄLINEENÄ	23
3.1 Lähtökohdat ja tavoite.....	23
3.2 Aineistot	24
3.3 Menetelmät.....	25
3.4 Hiilen ja typen määrät puustossa ja maaperässä	26
3.5 Metsätöiden päästöt metsikkötyyppien eri kiertoaika- vaihtoehtoissa	32
3.6 Tarkastelu.....	33
4 PUURAAKA-AINEEN TUOTANTO TEOLLISUUDEN ELINKAARIARVIOINNEISSA.....	33
4.1 Tavoite.....	33
4.2 Sovellusesimerkki hienopaperin tuotannosta.....	34
4.3 Tarkastelu.....	36
5 PÄÄTELMÄT.....	36
VIITTEET	38
KIRJALLISUUS	38
LIITTEET	

ALKUSANAT

Tämä raportti sisältyy projektiin *Puuntuotanto- ja hankintavaiheet metsän tuotteiden elinkaarilaskennassa*, joka on osa *Puuhuollon ympäristöjohtamisen välineet* -tutkimuskonsortiota.

Puuhuollon ympäristöjohtamisen välineet -tutkimuskonsortio on Metsäalan tutkimusohjelmaan Wood Wisdom kuuluva hanke, joka on ohjelman kautta saanut rahoitusta Tekesistä. Konsortiota on rahoittanut myös Biodiversiteettitutkimusohjelma FIBRE.

Konsortion muut hankkeet Metsätehossa ovat projektiin *Monimuotoisuuden mittaaminen ja seuranta* sekä *Tutkimustiedon analysointi ja hyödyntäminen ympäristöjärjestelmän ympäristövaikutusten arvioinnin keinoin*. Viimeksi mainittuun liittyy vielä kaksi muuta Metsäalan tutkimusohjelman hanketta: Joensuun yliopistossa toteutettu metsien kehityksen ja aine- ja energiavirtoja käsittelevä rinnakkaishanke sekä Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion metsätalouden elinkaari- ja ekotaselaskennan tiedonkeruun kehittämistä koskeva hanke.

Puuntuotanto- ja hankintavaiheet metsän tuotteiden elinkaarilaskennassa -projektin toteuttaminen edellytti puuntuotannon ja -hankinnan sekä metsäteollisuuden jo olemassa olevan monipuolisen ympäristöosaamisen kokoaamista sekä uutta tutkimusta varsinkin luonnon prosesseihin liittyvien ainevirtojen osalta. Metsäteho toimi KCL:n ja Joensuun yliopiston tutkijoiden sekä Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion asiantuntijoiden välisen yhteistyöverkoston koordinaattorina. Eri asiantuntijaorganisaatioiden osaamisalueita yhdistämällä voitiin tarkastella verraten laajaa, puuraaka-aineen tuotannon, hankinnan ja jalostuksen muodostamaa kokonaisuutta.

Joensuun yliopiston tutkimusryhmä kehitti metsien kehityksen ja käsittelyjen simulointiin soveltuvan prosessimallin, jonka avulla voidaan tutkia mm. erilaisten toimenpideketjujen vaikutuksia puuston ja maaperän hiilen ja typpien kiertoon. Tutkimusta johti Seppo Kellomäki. Projektiryhmässä työskentelivät Marja Kolström ja Sari Pitkänen sekä Harri Srandman ja Sergei Zhudin. Oleg Chertov ja Vladimir Komarov tukivat merkittävästi hankkeen toteutusta ja mallinnustyötä puuston kehitysdynamiikkaan ja maaperän ilmiöihin liittyvällä asiantuntemuksellaan. Metsätehon tutkijat osallistuivat metsiköiden kehitystä simuloivan mallin käyttöliittymän määrittelyyn. Erityisesti tavoitteena oli ottaa huomioon puuraaka-ainetta hyödyntävien tuotantoketjujen näkökulma. Käytännössä tämä merkitsi sitä, että metsien käsittelyt ja hakkuukertymät kuvattiin siten, että myös korjuun ja muiden metsänkäsittelytoimenpiteiden tarkastelu teknisestä ja tuotantotaloudellisesta näkökulmasta on mahdollista.

Tutkijat Tiina Pajula ja Helena Wessman KCL:stä osallistuivat puunhankinnan ja metsäteollisuuden välisten rajapintojen määrittelyyn ja teollisuuden elinkaariarvioinnin sovellusten raaka-aineprosessien päivittämiseen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion *Elinkaarilaskennan kehittäminen ja hyö-*

dyntäminen -projektin avulla voitiin demonstroida alueellista puuntuotantovaiheen kattavaa elinkaarilaskentaa. Tapiossa kehittämistyötä johti Jouko Kostamo ja hankkeeseen osallistuivat Sari Alden, Samuli Joensuu, Hannu Niemelä, Risto Ranta ja Tommi Tenhola. Metsätehossa osahankkeeseen osallistuivat Vesa Imponen, Simo Kaila, Antti Korpilahti, Olavi Pennanen, Asko Poikela, Jouni Väkevä sekä Metsätehon laskentasovelluksen kehittämisestä vastannut Jouko Örn. Metsätehon osaprojektin autokuljetusta koskevaa tietopohjaa täsmennettiin myös Tiehallinnon Olavi Koskisen kehittämän VEMOSIM-simulaattorin avulla.

Ohjaus- ja johtoryhmässä toimineet Metsätehon osakasyritysten, Metsähallituksen, Metsäteollisuus ry:n sekä MTK:n asiantuntijat vaikuttivat merkittävästi työn suuntaamiseen ja etenemiseen. Ryhmien työssä korostui soveltava ja hyödyntävä näkökulma, jonka määrittäminen oli vaativaa tällä uudella ja haasteellisella kehittämisalueella.

TIIVISTELMÄ

Metsäteho Oy:n projektissa ”Puuntuotanto- ja hankintavaiheet metsän tuotteiden elinkaarilaskennassa” kehitettiin metsien käsittelyn, korjuun ja kuljetuksen ympäristökuormituksen arviointia ja laskentasovelluksia ympäristöraportoinnin, ekotasetarkasteluiden, elinkaariarvioinnin sekä T&K-työn tarpeisiin. Lähtökohtana oli, että tuotantoketjun eri vaiheissa toimivat tahot vastaavat omalta osaltaan ympäristölaskennasta, mutta liittymät ja rajapinnat muihin tuotantojärjestelmän osiin on varmistettava ja testattava.

Metsätehossa päivitettiin ja kehitettiin puunhankintaoperaatioiden sekä metsänhoito- ja parannustöiden päästöjen laskentamenetelmiä. KCL:n, Metsäteollisuus ry:n, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion sekä Joensuun yliopiston kanssa toteutettujen käsiteanalyysien ja määrittelyjen pohjalta käynnistettiin luonnon prosessit, metsien käsittelytoimenpiteet, hankintaoperaatiot ja tuotteiden valmistusvaiheet kattava modulaaristen ympäristölaskentasovellusten rakentamiseen tähtäävä työ. Eri tuotantovaiheiden ja prosessien välisten liittymien toimivuutta testattiin sovellusesimerkkien avulla.

Metsätöitä ja kuljetusta koskevat energiankulutus- ja päästötiedot osoittautuivat verraten puutteellisiksi. Laskentamenetelmiä kehitettäessä jouduttiin ottamaan kantaa myös elinkaariarvioinneissa vastaan tuleviin tyypillisiin periaatteellisiin ongelmiin. Puunkorjuun osalta puutavaralajikohtaisten päästöjen laskentaan kehitettiin aiheuttamisperiaatteen perustuva ratkaisu, jossa lähtökohtana ovat tutkimustulosten mukaiset ajanmenekkimallit, joita on käytetty myös kustannusten kohdentamisessa.

Puuntuotannossa sovellettavat toimenpideketjut tuottavat eri metsäteollisuustuotteissa käytettäviä raaka-aineositteita tämän päivän ja tulevaisuuden tuoterakenteen vaatimissa suhteissa. Yksittäisten toimenpiteiden vaikutukset eivät yleensä kohdistu vain jollekin puutavaralajille ja tuotteelle. Metsien

hoidon osalta kysymyksessä on elinkaariarvioinnille tyypillinen allokointiongelma. Metsätehon energiankulutuksen ja päästöjen laskentamallissa metsänhoito- ja parannustöiden päästöt kohdennettiin yksinkertaisesti samansuuruisina alueelta korjatuille raaka-ainekuutiometreille.

Metsätaloudessa toiminnan ja metsävarjojen kestävyydestä huolehtiminen on sisäänrakennettuna sovellettaviin toimintamalleihin ja suunnitteluperiaatteisiin. Metsien käsittelyä toteutetaan ja suunnitellaan sekä metsikkö- että metsäaluetasolla. Metsätalouden ympäristölaskennassa oleelliset lisäpiirteet voidaan liittää näihin vanhoihin käsitteisiin ja tarkastelutapoihin. Tässä osahankkeessa tutkittiin ja kokeiltiin luonnonprosessien tärkeimpien ainevirtojen ja -taseiden lisäämistä kuutiometrejä ja markkoja käsitteleviin metsikkösimulaattoreihin ja metsäsuunnittelun malleihin. Lähestymistapa nojautuu systeemianalyysiin ja kehittyneisiin mallinnustyökaluihin, ja T&K-työ on tällä alueella vasta alkuvaiheessa.

Osahankkeella ei tähdätty kertaluonteiseen, uuden tutkimustiedon tuottamiseen. Tutkimuskonsortiossa mukana olleiden verkostoituneiden hankkeiden tuloksena suunniteltiin ja toteutettiin jo käytössä olleita analyysityökaluja kehittämällä useiden sovellusten muodostama yhteensopiva laskentamallikonaisuus, jota voidaan tarvittaessa hyödyntää ajankohtaisen ympäristökuormitustiedon tuottamisessa.

1 JOHDANTO

Metsäteollisuudessa ympäristöjohtaminen on ollut voimakkaassa kehitysvaiheessa koko viime vuosikymmenen ajan. Ympäristölähtöiset kehittämispaineet ja laatuajattelun soveltaminen johtivat sertifioitujen, standardoitujen ympäristöjärjestelmien käyttöönottoon. Samalla on kehitetty sidosryhmille suunnattavaa ympäristöraportointia.

Jatkuvasti etenevä kansainvälistyminen asettaa kasvavia vaatimuksia ympäristöasioiden hoitamiselle sekä yritysten että yhteiskunnan kannalta. Yksittäisten ympäristöongelmien erillisratkaisujen sijaan tavoitellaan kokonaisvaltaista elinkaarijohtamista, joka yhdistää elinkaariajattelun, ekokilpailukyvyyn sekä ympäristöjohtamisen lähestymistavat toisiinsa. Samalla ympäristöasiat ovat sulautumassa osaksi yleistä johtamistoimintaa.

Ympäristöongelmat ovat myös yritysten laskentaongelmia. Massa- ja paperiteollisuus ovat olleet edelläkävijöitä metsäalan elinkaariarvioinnin (LCA, life cycle assessment) kehittämisessä. Myös saha- ja vaneriteollisuus on aloittanut vastaavan kehittämistyön. Yrityskohtaisten ympäristöraporttien lisäksi tuloksia esitellään mm. Metsäteollisuus ry:n ympäristönsuojelun vuosikirjoissa. Tässä työssä metsät ja puuraaka-aineen tuotantovaihe ovat saamassa aiempaa suuremman painon.

Myös teknologisessa tutkimus- ja kehittämistyössä on tarpeellista selvittää vaihtoehtoisten ratkaisujen taloudellisuuden ohella niihin liittyvät ympäristöhaitat. Tämä edellyttää, että tutkimuksessa käytettävät todellisuuden kuvaukset ja laskentamallit ovat riittävän syvällisiä tarkasteltavien ilmiöiden

eri piirteiden suhteen. Metsällisten ympäristöongelmien selvittäminen edellyttää monipuolista systeemianalyttistä tutkimusotetta, ja tämän vuoksi T&K-työssä ja toisaalta operatiivisessa ympäristölaskennassa käytettävät lähestymistavat ovat luonteeltaan ja tarkkuusvaatimuksiltaan erilaisia.

Metsäalan elinkaarilaskennassa etenkin puuraaka-aineen tuottamista koskevat osat ovat olleet toistaiseksi verraten kehittymättömiä. Tähän on osaltaan vaikuttanut se, että tutkimuksen painopiste on ollut uusiutumattomia luonnonvaroja hyödyntävillä aloilla tai kuten metsäteollisuuden tapauksessa tehtaiden aiheuttamien ympäristövaikutusten selvittelyssä. Myös ISO 14040-standardin mukaan elinkaaritutkimus alkaa raaka-aineen hankintavaiheesta.

Metsätaloudessa luonnon prosessit ovat tuotantojärjestelmän tai LCA-terminologiaa käyttäen tuotejärjestelmän osina, ja metsien käsittelyssä tähdätään näiden luontaisten kasvu- ja kehitysprosessien hyödyntämiseen. Tavoitteena on tuottaa erilaatuisia raaka-aineositteita luonnonolojen antamien mahdollisuuksien mukaan määriltään halutuissa suhteissa. Vaihtoehtoiset metsien käytön strategiat vaikuttavat metsien ja koko tuotantojärjestelmän materiaali- ja energiavirtoihin. Myös laajentuva puuperäisen energian tuotanto muuttaa merkittävästi sekä luonnon että tuotannon prosesseja.

Tämän hankkeen tavoitteena oli kehittää puuraaka-aineen tuotantoa koskevaa elinkaarilaskentaa siten, että saatavat tulokset ovat liitettävissä teollisuuden LCA-malleihin ja laskentasovelluksiin. Tässä hankkeessa myös puunhankinnan eri vaiheet katsottiin raaka-aineen tuotantokäsitteen alueelle kuuluviksi, ja tarkastelu kattoi metsien luonnonprosessit, metsien käsittelytoimenpiteet sekä puunkorjuun ja kuljetukset.

Metsäteollisuuden tuotteita ja tehtaita koskevia analyysejä tehdään yrityksissä aina tarvittaessa, ja eri päätöstilanteissa moniulotteista ja -tasoista, puumaisesti haaroittuvaa tuotantojärjestelmää tarkastellaan eri näkökulmista. Tämän vuoksi elinkaarilaskentajärjestelmät kannattaa rakentaa modulaarisiksi, eri tuotantovaiheista ja osaprosesseista koottavissa oleviksi kokonaisuuksiksi. Tässä hankkeessa keskeisenä tavoitteena oli varmistaa, että raaka-aineen tuotantovaihetta koskevat osat saadaan rajapinnoiltaan yhteensopiviksi teollisuuden elinkaarityökalujen kanssa.

Niin massa- ja paperiteollisuuden kuin mekaanisen metsäteollisuuden näkökulmat olivat mukana Metsätehon vetämässä tutkimuksessa, jossa kehitettiin puun hankinta- ja tuotantovaiheet kattavaa elinkaarilaskentaa. Puuraaka-aineen tuottamiseen ja käsittelyyn liittyvien toimintojen yhteydessä kohdataan LCA-tarkasteluissa yleinen ympäristökuormituksen allokointiongelma. Puunhankintatoiminta muistuttaa tehtaiden tuotantoprosesseja, ja kuormituksen kohdentamisessa voidaan käyttää samantyyppisiä periaatteita. Metsänhoitotöissä kohdentamisongelma on aito, ja käytännön ratkaisutavat voivat vaihdella valittavan näkökulman mukaan.

Tässä raportissa esitellään elinkaarilaskennan kehittämissyhteistyössä tähän mennessä aikaansaatuja tuloksia. Aihetta lähestytään sovellusesimerkkien kautta, ja tarkoituksena on antaa yleiskäsitys tämän hetkisestä kehitysvaiheesta metsän tuotteiden elinkaarilaskennassa. Tarkoituksena on erityisesti hahmottaa eri tuotantovaiheiden keskinäisiä liittymiä ja rajapintoja pelkistettyjen laskentatapausten kautta.

2 YKSITYISMETSIIEN ELINKAARILASKENNAN KEHITTÄMINEN

2.1 Projektin tausta

Metsäteollisuusyritykset ja niiden hankintaorganisaatiot ovat ottaneet käyttöön ympäristöjärjestelmät, ja yrityskohtaisissa ympäristöraporteissa esitellään myös puuraaka-aineen tuotantovaiheen kehitystä. Biodiversiteetti ja hiilen sidonta ovat keskeisiä seurantakohteita. Metsäteollisuuden raaka-aineista tulee kuitenkin valtaosa muualta kuin yritysten omistuksessa olevilta metsämailta. Esimerkiksi vuonna 1999 yksityismetsät tuottivat 86 % kotimaisesta ainesraakapuusta.

Verkostoituneessa tuotanto- ja alihankintaketjussa myös puuraaka-aineen hyödyntäjillä on tarvetta viestiä raaka-ainelähteenä ja tuotantojärjestelmän suoranaisena osana käyttävän metsäluonnon kehitystä kuvaavia tietoja. Tämä edellyttää, että yksityismetsätalouden käyttöön kehitetään monimuotoisuuden seurannan lisäksi myös metsien hiili-, ravinne- ja energiataseiden tarkasteluun soveltuvia järjestelmiä. Lisäksi kansainväliset ilmastopöytäkirjat saattavat edellyttää jatkossa metsäalueiden sitoman hiilivaraston täsmällisempää määrittelyä.

Projektin tavoitteena oli tuottaa yksityismetsätalouden aineistoa ekotaselaskelmia varten. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion toteuttama yksityismetsien elinkaarilaskennan kehittämishanke oli osa Metsäalan tutkimusohjelmaa. Hanke täydensi Metsätehon vetämää, puuhuollon ympäristöjohtamisen välineiden kehittämiseen tähtäävää hankekokonaisuutta, ja tutkimus- ja kehittämistyössä hyödynnettiin sekä Metsätehon että Tapion osaamista ja laskentasovelluksia.

Yksityismetsien elinkaarilaskennan kehittämisessä ja testauksessa käytettiin Keski-Suomen metsäkeskuksen metsiä ja metsätaloutta koskevia tietoja. Alueellisia tarkasteluja tehtiin toteutunutta toimintaa koskevien vuositilastojen sekä metsäsuunnitelmien pohjalta. Kehittämistyötä ja laskentakokeita tehtiin seuraavilla, erilaisia analysointitarpeita palvelevilla tavoilla:

1. Metsätöiden päästölaskelmat vuositilastojen pohjalta
2. Vuositason ekotase tilastoihin perustuen
3. Liittäen aine- ja energiavirrat metsäsuunnitteluun

Puunkorjuun, metsänhoito- ja perusparannustöiden pakokaasupäästöjen laskenta on viitekehikoltaan ja tavoitteen asettelultaan selkeä. Tarkasteluissa tarvitaan tosin runsaasti tilastoihin ja arvioihin perustuvia tietoja eri toimintojen ja työlajien vuotuisista suoritteista, koneiden polttoaineiden kulutuksesta sekä päästöistä, joita joudutaan käsittelemään monitasoisilla laskentamalleilla.

Elinkaariarviointien päästölaskelmissa on usein lähtökohtana koneiden vuotuinen käyttöaika. Metsäalalla tunnetaan verraten hyvin kaikkien työlajien ja koneiden eri olosuhteita vastaavat tuotokset, joiden avulla voidaan laskea suoriteyksikköä kohti tarvittavien konetuntien määrä.

Läpileikkaustyypin vuositason ekotasetarkastelun voidaan ajatella edustavan tasapainotilaa, joka voi säilyä lähes häiriintymättömänä vuodesta toiseen elleivät olosuhteet ja toimintaympäristö kovin oleellisesti muutu. Kun laskentajärjestelmät ja tietokannat saadaan aikanaan käyttökelpoisiksi, vuositason alueellisia ekotaseita voidaan tuottaa yksityismetsien ympäristöraportteihin, jotka puolestaan ovat käytettävissä viitetietoina hankintaorganisaatioiden vastaavissa raporteissa.

Metsäsuunnittelu on puuntuotannon ja metsien käsittelyn strategista suunnittelua, jota tehdään vähintään kymmenen vuoden aikajänteellä. Tarvittaessa empiirisistä aineistoista laskettuihin tilastollisiin kasvumalleihin perustuvan metsäsuunnittelun aikahorisonttia voidaan pidentää useampiin kymmeneen vuosiin. Metsien ekologisen tilan ja kehityksen mallinnus edellyttää jo noin sadan vuoden tarkastelujaksoa ajassa eteenpäin, ja tässä työssä tarvitaan kehittyneitä luonnonprosesseja kuvaavia malleja.

2.2 Metsätöiden päästöt Keski-Suomessa – laskentaesimerkki

Poltto- ja käyttöaineiden kulutuksen, yksikkö- ja kokonaispäästöjen sekä ekotaseiden laskemiseksi kerättiin aineistoa Tapion vuositilastosta, Metsätieteen aikakauskirjasta (4B, 1998) sekä suullisten haastattelujen avulla. Tämä aineisto kattaa Keski-Suomen metsäkeskuksen aluetta koskevat tiedot vuosien 1995 – 1999 markkinahakkuista sekä metsänhoito- ja perusparannustöiden määristä. Tilastoissa ei erikseen esitetä eri hakkuutavoilla korjattuja puu- ja puutavaramääriä. Niiden arvioinnissa käytettiin Tapiossa erikseen tätä selvitystä varten laadittua menetelmää.

Tässä raportissa tarkoituksena on esitellä ympäristökuormituksen laskenta-periaatteita ja -menetelmiä. Tämän tavoitteen kannalta on riittävää tarkastella keskeisten ilmaston lämpenemiseen vaikuttavien CO₂- ja NO_x-päästöjen kehitystä koskevia tuloksia. Tämä rajausta perustuu myös siihen, että hiili ja typpi ovat tärkeimmät alkuaineet metsien ravinnekierrossa.

Keski-Suomen yksityismetsistä korjatut puumäärät kasvoivat viime vuosikymmenen puolivälistä noin viidenneksellä vuosikymmenen loppuun mennessä. Tällä aikajaksolla hakkuumäärät olivat korkeimmillaan vuonna 1998 (taulukko 1).

Vuonna 1995 ensiharvennusten osuus oli 10 %, ja vuonna 1999 se oli kasvanut 12 %:iin. Vastaavat muiden harvennusten osuudet olivat 13 ja 15 %. Samanaikaisesti uudistushakkuiden osuus luonnollisesti aleni 77 %:sta 73 %:iin (taulukko 1).

Metsänhoito- ja metsänparannustöiden osalta kehitys ei ollut niin tasaista kuin korjuussa. Eri työläjien osuudet vaihtelevat, mihin lienee vaikuttanut myös näihin töihin suunnatun julkisen rahoitustuen muutokset (taulukko 2). Tilastotiedoista on nähtävissä esimerkiksi nuoren metsän kunnostuksen merkittävä kasvu viimeisen tarkasteluvuoden aikana.

TAULUKKO 1 Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsien markkinahakkuut hakkuutavoittain vuosina 1995 -1999

Vuosi	Ensiharvennus, m ³	Muu harvennus, m ³	Uudistushakkuu, m ³	Yhteensä, m ³
1995	376 744	528 757	3 046 499	3 952 000
1996	344 143	587 080	3 057 777	3 989 000
1997	422 149	739 886	3 498 965	4 661 000
1998	593 744	711 986	3 591 271	4 897 000
1999	550 785	685 010	3 364 205	4 600 000

TAULUKKO 2 Keski-Suomen metsäkeskuksen alueen yksityismetsien metsänhoito- ja metsänparannustyöt vuosina 1995 -1999

Työlaji	1995	1996	1997	1998	1999
	ha				
Hakkuualan raivaus	3 544	3 984	2 369	3 045	1 978
Äestys, laikutus, kon. kylvö	8 235	7 633	11 016	8 097	7 268
Mätästys	1 406	1 233	-	1 731	1 941
Istutus	5 765	6 407	9 483	6 745	6 961
Taimikonhoito	7 548	5 541	7 927	7 711	132
Nuoren metsän kunnostus	3 337	3 012	4 447	6 090	15 827
Metsälannoitus	47	129	596	1 116	386
Ojitus	4 691	3 467	3 641	2 765	4 839
	km				
Metsäteiden rakennus	187	155	227	167	125
Metsäteiden perusparannus	24	12	11	28	25
Metsäteiden kunnossapito	3 100	3 100	3 100	3 100	3 100

Päästöjen laskentaperiaatteet

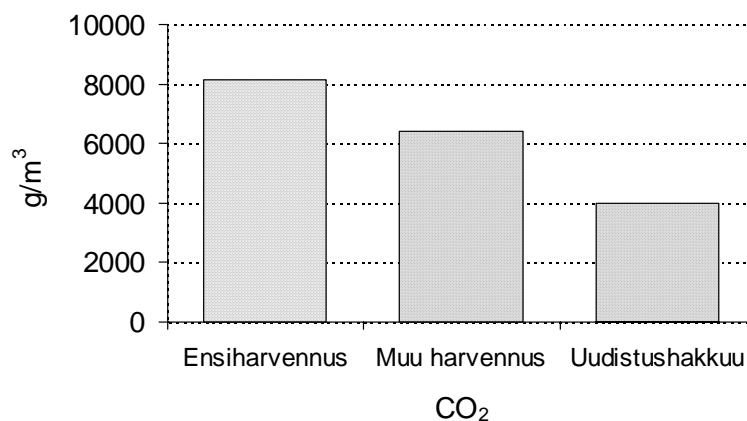
Metsätehossa kehitetty puuntuotannon, puunkorjuun ja kaukokuljetuksen energian ja käyttöaineiden kulutuksen laskentamenetelmä ottaa huomioon eri hakkuutapojen puu- ja puutavaralajimäärät sekä hakkuutapakohtaisen runkojen koon vuosittaisen vaihtelun (Örn 2001).

Eri hakkuutapojen puutavaralajikohtaiset tiedot olivat aineistona yksityismetsien metsätöiden päästöjä laskettaessa. Mikäli hakkuutapojen runkojen keskijäreys ei ole annettu, Metsätehon päästölaskentamalli käyttää hakkuutapakohtaisia olettamusarvoja.

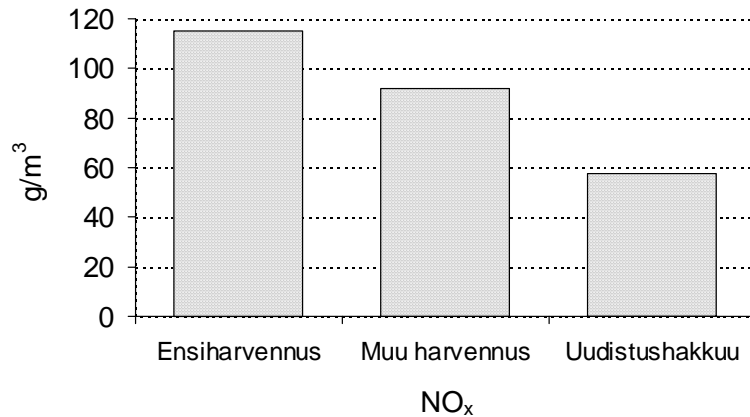
Hakkuun ja metsäkuljetuksen tuottavuus- ja kulutustiedot lasketaan runkojen tilavuuden funktiona. Metsänhoidon ja metsänparannuksen tuottavuus arvioidaan hehtaareina, ja metsäteiden rakentamisen ja ylläpidon tuottavuus kilometreinä konetuntia kohti. Manuaalisen työn osalta käytetään eri työläjien päivätuotoksia.

Metsätehon päästöjen laskentamalli kohdentaa puunkorjuun ympäristökuormituksen työajanmenekkien suhteessa eri hakkuutavoille sekä eri metsäteollisuustuotteiden valmistuksessa käytettäville puutavaralajeille. Tässä aiheuttamisperiaatteen mukaisessa laskennassa sovelletaan samaa menetelmää kuin kustannuksia kohdennettaessa.

Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsien puunkorjuussa vuonna 1999 kuutiometriä kohti lasketut CO₂- ja NO_x-pakokaasupäästöt olivat ensiharvennuksissa noin kaksinkertaiset uudistushakkuisiin verrattuna. Muut harvennukset sijoittuvat korjuuolosuhteiltaan ja myös yksikköpäästöltään pienirunkoisimpien ja järeimpien kohteiden välille samalla tavoin kuin korjuukustannuksetkin (kuvat 1 ja 2).



Kuva 1. Korjuun CO₂-yksikköpäästöt hakkuutavoittain Keski-Suomessa vuonna 1999.



Kuva 2. Korjuun NO_x-yksikköpäästöt hakkuutavoittain Keski-Suomessa vuonna 1999.

Puunhankintaorganisaatiot käyttävät Metsätehon vuonna 1994 kehittämää hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannusten kohdentamismenetelmää (Oijala ja Terävä 1994). Kunkin puutavaralajin kustannukset määräytyvät korjuun vaatiman ajanmenekin ja pinta-alayksikköä kohti korjatun puumäärän perusteella.

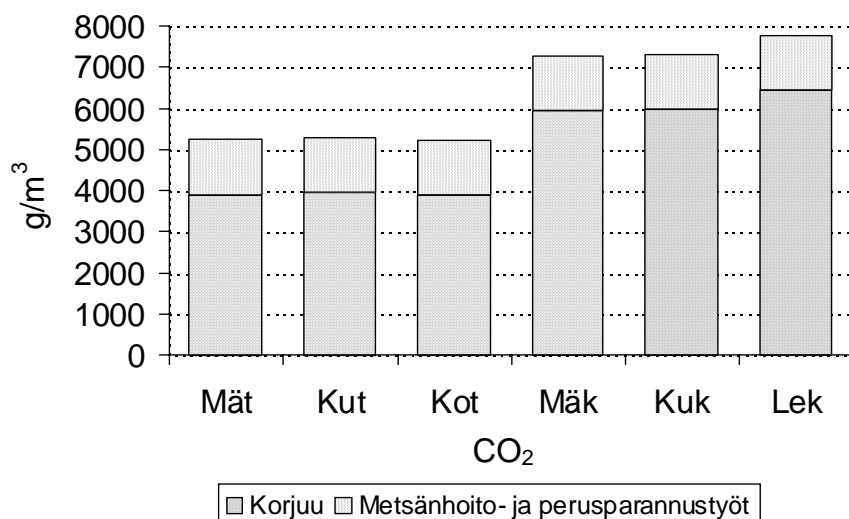
Kustannusten ja päästöjen kohdennusmallissa hakkuun ajanmenekit lasketaan hakkuutavan, poistuman tiheyden sekä hehtaarikohtaisen runkoluvun perusteella. Hakattu puujoukko mallinnetaan puiden rinnankorkeusläpimittojen jakaumina (runkolukusarja). Jos todellista läpimittajakaumaa ei tunneta, se voidaan ennustaa runkojen lukumäärän, keskijäreyden ja pienimmän rungon rinnankorkeusläpimitan avulla. Ennustaminen perustuu Weibull-jakauman käyttöön. Puutavarakertymien ja ajanmenekkien laskemiseksi määritetään runkojen käyttöosien tilavuudet puulajeittain ja rinnankorkeusläpimittaluokittain. Malli tuottaa laskennalliset ajanmenekki- ja tavaralajijakaumat, jotka oikaistaan todellisia puumääriä vastaaviksi.

Metsäkuljetuksen osalta kohdennuksessa käytettävät ajanmenekit perustuvat suoraan mitattuihin tavaralajimääriin, kunkin erillään kuljetettavan yksittäisen tavaralajin ajouranvarsitiheyteen (m³/100 m) tai samassa kuormassa kuljetettavien lajien yhteiseen ajouranvarsitiheyteen sekä keskikuljetusmatkaan.

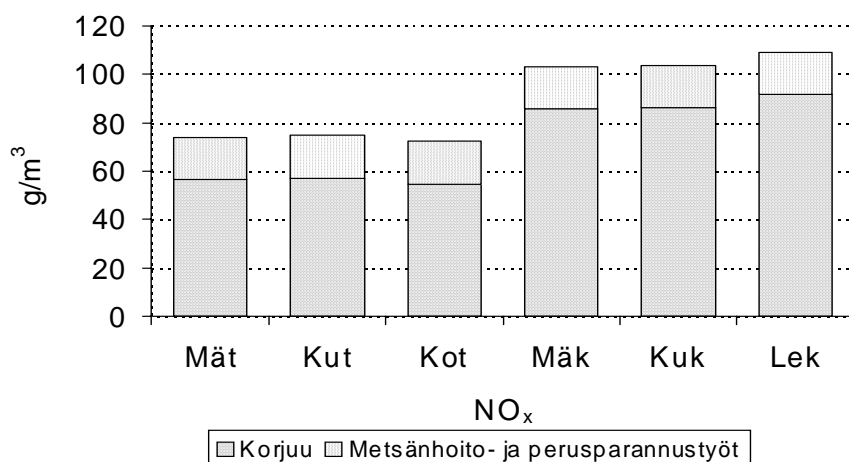
Metsätehon metsätöiden päästöjen laskentamallissa kohdennusperusteet määritetään hakkuutapakohtaisesti todellisista korjuukohteista kootun otoksen perusteella, ja näiden otoksien mukaisilla kohdennuskertoimilla määritetään kunkin hakkuutavan tavaralajikohtaiset yksikköpäästöt.

Metsänhoito- ja metsänparannustöiden vuotuiset koko tarkasteltavalta toiminta-alueelta kertyneet summapäästöt kohdennetaan suoraan korjatuille puutavaralajeille samansuuruisena kuutiometrikohtaisena yksikköpäästönä. Metsänhoito- ja metsänparannustöiden osuus kuutiometrikohtaisesta summyksikköpäästöstä on noin viidennes.

Tukkipuun yksikköpäästöt ovat noin 70 % vastaavista kuitupuun päästöistä. Tukkitavaralajeilla metsänhoito- ja metsänparannustöiden osuus on 25 % yksikköpäästöistä, ja vastaava osuus kuitupuutavaralajeilla on 18 %. Kun tarkastellaan pelkästään korjuuvaiheen CO₂- ja NO_x-päästöjä, tukkipuun ja kuitupuun välinen tasoero on suurempi (kuvat 3 ja 4).



Kuva 3. Korjuun puutavaramuotojen CO₂-yksikköpäästöt hakkuutavoittain Keski-Suomessa vuonna 1999.



Kuva 4. Korjuun puutavaramuotojen NO₂-yksikköpäästöt hakkuutavoittain Keski-Suomessa vuonna 1999.

Korjuun ja metsänhoidon sekä metsäparannuksen päästöt voidaan kohdentaa puutavaramuotojen kautta edelleen tuotantolaitoksille ja tuotteille. Puutavaran kaukokuljetukset tehdään yleensä tavaralajeittain, jolloin kuljetusmaksut kohdentuvat suoraan puutavaraerille.

Metsätöiden päästöjen kehitys vuositilastojen mukaan 1995 - 1999

Keski-Suomen yksityismetsissä harvennushakkuiden osuus lisääntyi vuosien 1995 – 1999 aikana. Hakkuussa keskimääräinen rungon koko pieneni tämän seurauksena, mikä nosti korjuun kuutiometriä kohti laskettuja yksikköpäästöjä. Samanaikaisesti muissa metsätöissä yksikköpäästöt alenivat. Taulukossa 3 on esitetty laskentaan ja arviointeihin perustuvat yksikköpäästöt vuonna 1995 ja 1999.

TAULUKKO 3 Korjuun sekä metsänhoito- ja metsänparannustöiden yksikköpäästöt Keski-Suomen yksityismetsissä

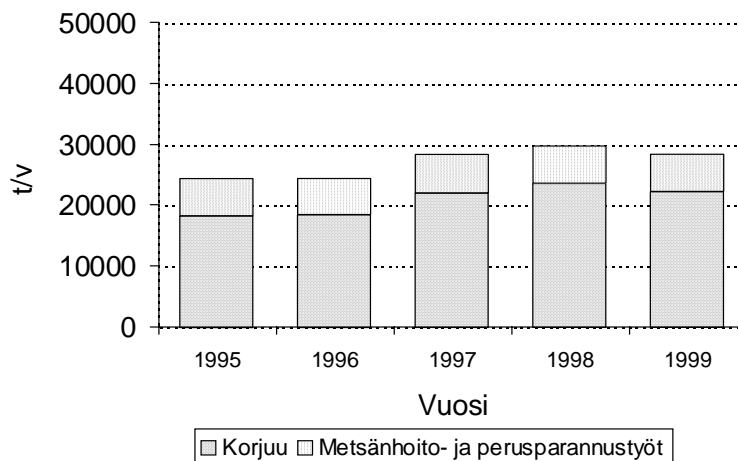
Toiminto	1995	1999	1995	1999	
	CO ₂ g/m ³		Suhteellinen CO ₂ -päästö/m ³		
Korjuu Metsänhoito- ja metsänparannus	4 610	4 847	100	105	
	1 562	1 463	100	85	
		NO _x g/m ³		Suhteellinen NO _x -päästö/m ³	
Korjuu Metsänhoito- ja metsänparannus	63,8	69,7	100	109	
	21,1	17,6	100	83	

Toimintaolosuhteiden muutoksista johtuvat vuosien väliset erot yksikkökohtaisissa kuormissa ovat verraten pieniä. Tämä laskelma on kuitenkin vain arvio, ja esimerkiksi käytössä olleen metsäteknologian ja moottoreiden uusiutumista ei ole otettu huomioon.

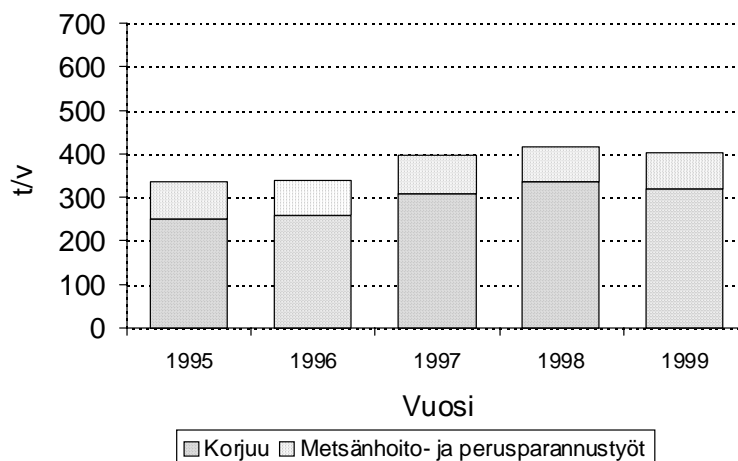
Aluekohtaisessa päästöjen raportoinnissa eri toimintojen aiheuttama kokonaisympäristökuorma on keskeinen seurattava tieto. Siihen päästään kertomalla yksikköpäästöt kunkin toiminnon tai työlahin kokonaissuoritemäärillä.

Metsätöiden pakokaasupäästöjen kautta aiheutuva vuotuinen kokonaisympäristökuorma kasvoi vuosien 1995 – 1999 aikana. Tähän vaikutti ennen kaikkea korjuumäärien noin 20 % kasvu. Samanaikaisesti myös korjuun yksikköpäästöt kasvoivat noin 5 % (kuvat 5 ja 6, s. 15).

Metsänhoitotöiden osuus kokonaispäästöistä säilyi lähes samana. Korjattua kuutiometriä kohti lasketut yksikköpäästöt hieman alenevat, mikä myös johtui korjuumäärien kasvusta suhteessa metsänhoito- ja metsänparannustöiden määriin.



Kuva 5. Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsien korjuusekä metsienhoito- ja perusparannustoiminnasta aiheutuneet vuotuiset CO₂-kokonaispäästöt vuosina 1995 – 1999.



Kuva 6. Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsien korjuusekä metsienhoito- ja perusparannustoiminnasta aiheutuneet vuotuiset NO_x-kokonaispäästöt vuosina 1995 – 1999.

2.3 Ravinnetaseen laskentakoe

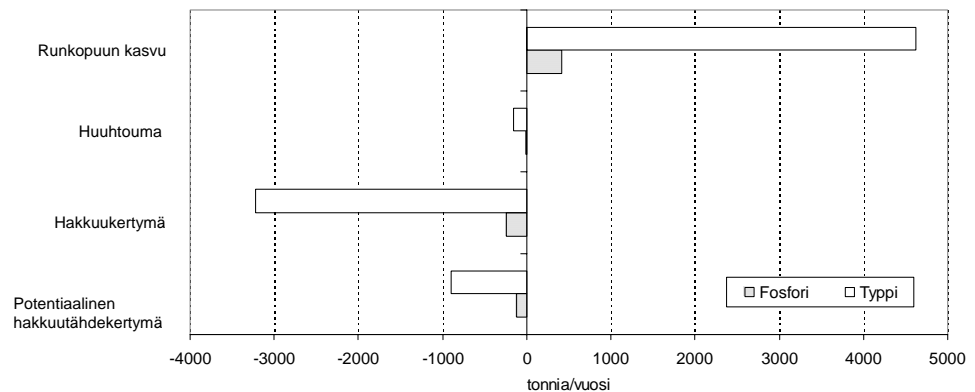
Metsäkeskuksen yksityismetsien ravinnetase laskettiin vain vuodelle 1999. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion toteuttamissa arvioinneissa ja laskelmissa otettiin huomioon ravinteiden kumulatiivinen huuhtouma takautuvasti vuonna 1990 tehdyistä toimenpiteistä alkaen. Tarkasteltavat ravinteet olivat typpi ja fosfori.

Ravinnetaseen arvioinnissa käytettiin seuraavia lähtötietoja:

- Pystypuuston tilavuus kehitysluokittain ja puulajeittain
- Runkopuun kasvu, m³/v
- Hakkuutiedot hakkuutavoittain ja puutavaralajeittain sekä runkojen, oksien ja neulasten massoihin liittyvät tiedot vuodelta 1999
- Kertoimet potentiaalisen hakkuutähdekertymän laskemiseksi
- Puun eri komponenttien typpi- ja fosforipitoisuus
- Toteutuneet metsänhoitotoimenpiteet vuosilta 1990 - 2000
- Toimenpiteiden aiheuttama kokonaistypen ja kokonaisfosforin huuhtouman lisäys (kg/ha/v) kymmenen vuoden aikasarjana

Lähtötietojen avulla laskettiin vuosina 1990 - 1999 toteutuneiden hakkuiden, ojituksen, metsäteiden rakennuksen ja lannoituksen kumulatiivinen valumavaikutus vuoteen 2000 asti. Potentiaalisen hakkuukertymän mukana metsästä poistuvat typpi- ja fosforimäärät vastaavat tilannetta, jossa kaikki korjattavissa oleva hakkuutähde otetaan käyttöön. Pysty akselin vasemmalla puolella on esitetty tässä tapauksessa metsään jäävän tähteen typpi- ja fosforimäärät (kuva 7).

Ravinteiden huuhtoumistakin saatiin arvio, joka perustuu alalla toistaiseksi tehtyihin tutkimuksiin. Tässä esimerkissä vesistöjä kuormittavan vaikutuksen oletettiin kestävän 10 vuotta, ja vaikutuksen kehitys oli aleneva. Tietyntoimenpiteen, esimerkiksi hakkuun vuosikuormitus valuma-alueella oli alueen eri-ikäisten hakkuiden tarkasteluvuoden vuosikuormitusten summa.



Kuva 7. Keski-Suomen yksityismetsien ravinnetase vuonna 1999.

Runkopuun kasvuun sitoutuvat typpi- ja fosforimäärät näyttäisivät ylittävän poistuvat määrät, vaikka tässä laskelmassa eivät ole mukana oksat ja neulaset. Totaalinen energiapuun korjuu aiheuttaisi kuitenkin merkittäviä vaikutuksia ravinnetaseeseen.

Koneellisista metsätöistä aiheutuvat vuotuiset typpiyhdisteiden pakokaasupäästöt ovat noin 10 % hakkuussa poistuvan typen määrästä (kuvat 6 ja 7). Tässä vertailussa on huomattava, että kuvassa 6 on kysymys NO_x-yhdisteistä, joissa happi on mukana.

Metsäteollisuuden tuotantoketjuissa aineiden ja energian virrat ovat huomattavia metsien luonnonprosesseissa sekä massa- ja paperiteollisuudessa. Puuraaka-aineen tuotantoon liittyvien toimintojen metsänhoidon, korjuun sekä kuljetuksen osuus ympäristövaikutuksista on pieni, mutta se on joka tapauksessa selvitetävä ja osoitettava ympäristöraporteissa sekä otettava huomioon elinkaaritarkasteluissa. Aineiden ja energian kokonaistaseiden kannalta metsien puumäärien muutokset ovat keskeisiä.

2.4 Elinkaarilaskenta osana metsäsuunnittelua

Lähtökohta

Tämän hankkeen tavoitteena oli kehittää ja kokeilla menetelmiä, joilla metsien aine- ja energiavirrat sekä vastaavat taseet saadaan liitettyä metsäsuunnitteluun. Tämän tavoitteen asettelu kannalta yhden metsäkeskuksen suunnitteluaineisto katsottiin riittäväksi. Suunnittelujärjestelmään perustuvissa tarkasteluissa käytettiin esimerkkiaineistona Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsiä koskevia tietoja vuosilta 1996 - 1999.

Yleensä metsäsuunnittelun aikajänne on 10 vuotta. Tässä hankkeessa metsien kehitystä tarkasteltiin ekologisesta näkökulmasta, ja sen vuoksi aikahorisonttia pidennettiin 30 vuoteen.

Tapion aluelaskennan ohjelmisto kasvattaa aluksi tietokannasta poimimansa metsäsuunnitteluaineiston MELAlla (metsälaskelma) samaan lähtövuoteen, joka oli tässä laskentakokeessa vuosi 2000. Tämän jälkeen MELA simuloi ja optimoi metsien käsittelyä ja kehitystä 30 vuoden ajan vuoteen 2030.

MELA maksimoi kantorahatuloja annettujen rajoitteiden puitteissa. Tässä tapauksessa vaadittiin, että puuston kokonaistilavuuden ja tukkipuun tilavuuden tuli olla kolmannen 10-vuotiskauden lopussa vähintään yhtä suuria kuin ensimmäisen 10-vuotiskauden jälkeen. Yleensä rajoitteena on alkupuuston tukki- ja kokonaistilavuus. Tässä tarkastelussa kuitenkin ensimmäisten kymmenen vuoden aikana metsien käsittelyvaihtoehdot simuloitiin suoraan suunnittelijan maastossa ehdottamien toimenpiteiden mukaisesti.

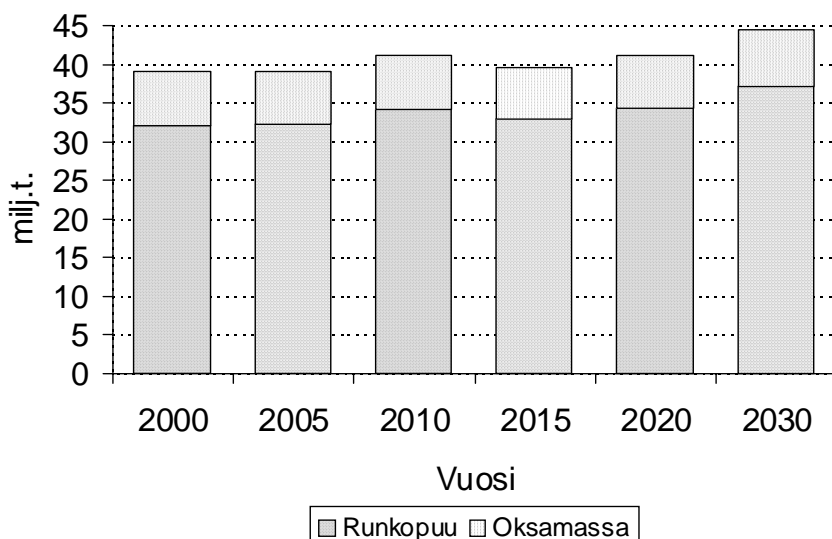
MELA-optimointien mukaisesti kehittyvän, pystyssä olevan puuston kuumetrit muunnettiin vastaaviksi hiili- ja typpimääriksi. Lisäksi Metsätehon metsätöiden päästömallia käyttäen laskettiin ennustettujen metsien käsittelytoimenpiteiden aiheuttamat päästöt. MELAn tuottamat hakkuutavoittaiset hakkuusuunnitteet ja metsäsuunnitelman mukaiset metsänhoito- ja metsänparannustoimenpiteet on esitetty suunnittelukausittain liitteessä 1.

Puuston hiili- ja typpimäärien kehitys

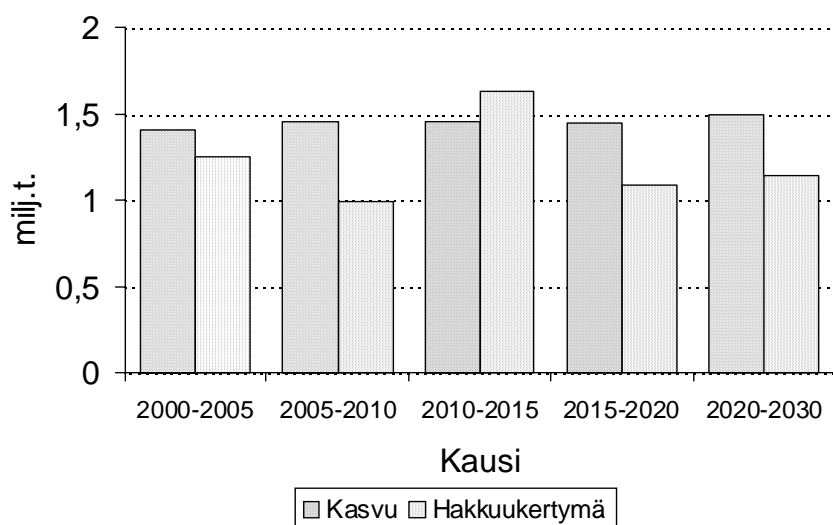
Keski-Suomen yksityismetsien puumäärien kehitys on lievästi kasvava johduen MELA-optimoinnille asetetusta kestävyysvaatimuksesta, joka estä puuston kokonaistilavuuden ja tukkipuun tilavuuden alenemisen (liite 1). Kokonaistilavuus on vuonna 2000 vajaat 160 milj. m³, ja se kasvaa vuoteen 2030 mennessä noin 180 milj. m³:iin. Kasvu on pääosin kuitupuuta, koska tukkipuun tilavuus on suunnittelukauden alussa vuonna 2000 noin 72 milj. m³ ja lopussa vuonna 2030 noin 73 milj. m³.

Puuston vuotuinen kasvu oli peräkkäisten tarkastelujaksojen aikana koko ajan noin 7 milj. m³ vuodessa. Vain aikajaksolla 2015 - 2020 kasvu on selvästi tätä suurempi (liite 1). Ainespuun suunniteltu hakkuukertymä on taas suurimmillaan edeltävällä kaudella 2010 - 2015. Tällä kaudella hakkuukertymä myös ylittäisi vuotuisen kasvun.

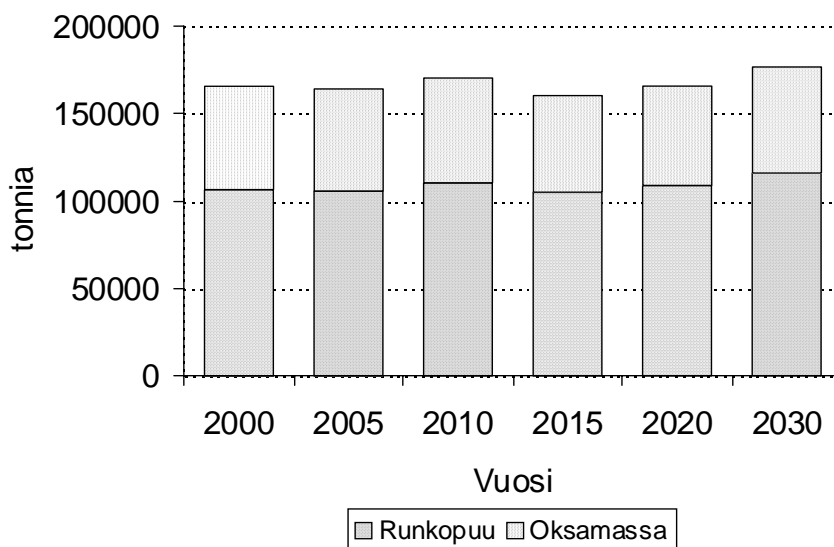
Kasvamassa olevaan puustoon sitoutuneet hiili- ja typpimäärät laskettiin puun eri komponenttien kuivamassojen perusteella. Hiilen suhteellinen osuus kokonaiskuivamassasta on lähes sama runkopuussa ja oksissa (kuva 8). Oksamassojen merkitys typpivarastona tulee esille kuvassa 10.



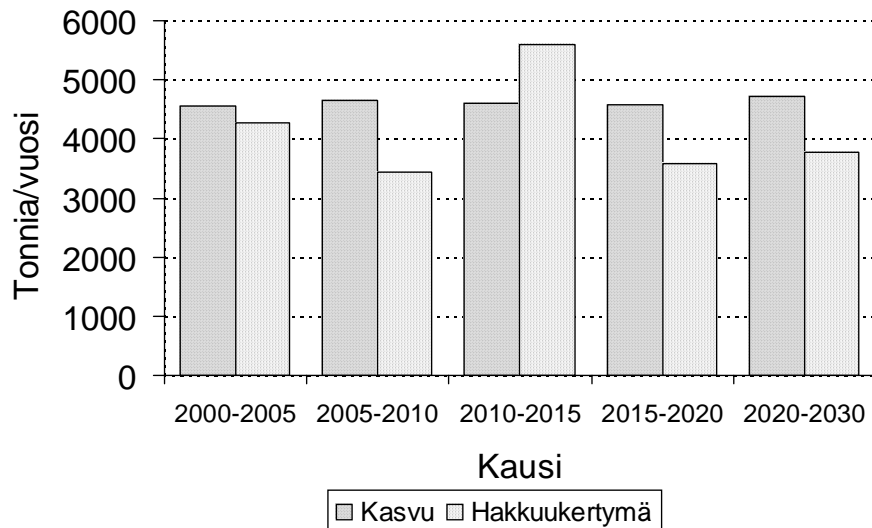
Kuva 8. Keski-Suomen yksityismetsissä kasvamassa olevan puuston hiilimäärä suunnittelujaksojen päättymisvuosina.



Kuva 9. Keski-Suomen yksityismetsissä vuotuisen runkopuun kasvun ja ainespuun hakkuukertymän sisältämä hiilimäärä eri suunnittelukausien aikana.



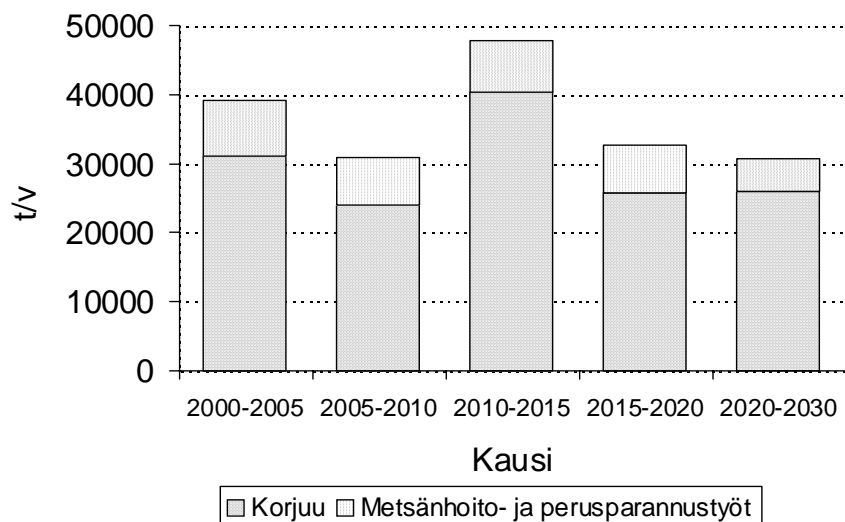
Kuva 10. Keski-Suomen yksityismetsissä kasvamassa oleva puuston tyyppimäärä suunnittelujaksojen päättymisvuosina.



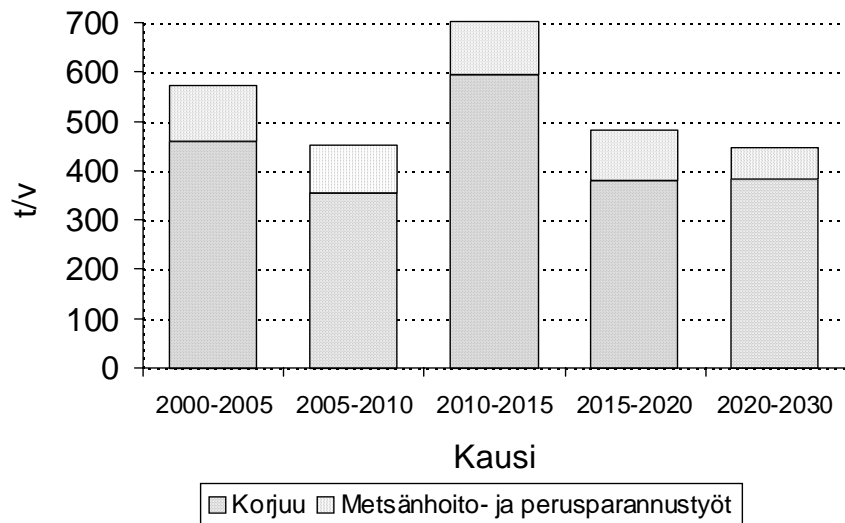
Kuva 11. Keski-Suomen yksityismetsissä vuotuisen runkopuun kasvun ja ainespuun hakkuukertymän sisältämä typpimäärä eri suunnittelukausien aikana.

Metsätöiden päästöt eri suunnittelukausilla

Metsänhoidon ja metsänparannustöiden kokonaispäästöt laskettiin metsäsuunnittelun yhteydessä vastaavalla tavalla kuin tarkasteltaessa toteutunutta tilannetta vuositilastojen perusteella. Hakkuut kuvattiin ensiharvennuksista, muista harvennuksista sekä uudistushakkuista tulevana puutavaralajien vuotuisina kertyminä (kuvat 12 ja 13).



Kuva 12. Keski-Suomen yksityismetsissä tehtävien metsätöiden aiheuttamat vuotuiset CO₂-päästöt.



Kuva 13. Keski-Suomen yksityismetsissä tehtävien metsätöiden aiheuttamat vuotuiset NO_x-päästöt.

Vuoteen 1999 verrattuna metsäsuunnittelun ensimmäisellä kaudella vuosina 2000 - 2005 metsätöiden hiili- ja typpiyhdisteiden päästöt näyttäisivät kasvavan noin kolmanneksella (kuvat 5 ja 6, s. 15). Tämä johtuu pääosin kokonaiskorjuumäärien kasvamisesta. Myös ensiharvennusten osuuden lasketaan kasvavan nykyisestä 12 %:sta 15 %:iin. Vastaavat ennusteet kaikkien harvennushakkuiden osalta ovat 27 ja 34 %, mikä merkitsee uudistushakkuiden osuuden alenemista 73 %:sta 66 %:iin. Tämä hakkuutaparakenteen muuttuminen aluksi harvennuspainotteisemmaksi kasvattaa myös korjuun päästöjä (kuvat 12 ja 13). Myöhemmin harvennusten osuus alkaa taas vähentyä, mikä on nähtävissä myös korjuun päästöjen kehityksessä. Suunnittelukaudella 2010 - 2015 etenkin korjuumäärät kasvavat voimakkaasti, ja samalla myös metsänhoitotyöt lisääntyvät, mikä on nähtävissä myös kokonaispäästöissä.

Myös taimikonhoitotöiden oletetaan lisääntyvän moninkertaisiksi nykyisestään (vrt. taulukko 2 ja liite 1, liitetaulukko 2). Kun toteutunutta ja ennustettua tilannetta vertaillaan on otettava huomioon, että liitteessä 1 esitetyt luvut ovat ennusteita viiden vuoden kausille. Taimikoiden hoidon lisääntymistä kompensoi nuorten metsien kunnostuksen väheneminen.

2.5 Tarkastelu

Hankkeessa koottiin ja kehitettiin yksityismetsien ympäristöraportoinnissa tarvittavaa tietopohjaa. Esimerkkilaskelmien avulla testattiin päästöjen ja ekotaseiden laskentaperiaatteita ja -malleja. Hakkuiden ja muiden toimenpiteiden tilastointiin perustuva päästöjen laskenta edellytti puunhankinta- ja tuotantovaiheiden välistä käsitteiden ja sovellusten rajapintojen määrittelyä, jota on tarpeellista jatkaa. Hakkuussa poistuvien runkojen keskijäreys on tärkein korjuun tuottavuuteen ja tekniikoihin vaikuttava tekijä, joka pitäisi ottaa huomioon korjuuolosuhteiden tilastoinnissa sekä metsäsuunnittelussa.

Puunhankinnan osalta tarkasteltiin vain perinteisiä karsittuja tavaralajeja tuottavia ketjuja. Myös puupolttoaineiden tuotantoketjujen tuotoksia ja päästöjä selvitettiin, ja tienvarsihaketuksen perustuva ratkaisu kuvattiin Metsätehon päästöjen laskentamalliin. Energiapuun talteenoton hankinnan ympäristökuormitusta ja vaikutuksia energiavirtoihin ei kuitenkaan vielä tehty aluetasolla. Tältä osin jatkoselvitykset ovat tarpeellisia.

Metsätöiden päästölaskennan lisäksi kokeiltiin vuositason aine-, energia- ja ravinnetaseiden laskentaa, ja tässä raportissa esitettiin esimerkki ravinnetaseesta yhden toimintavuoden osalta (1999). Tässä yhteydessä selvitettiin myös ravinteiden huuhtoumista käytettävissä olevan tutkimustiedon pohjalta. Tuloksia on raportoitu Tapion yksityismetsätalouden elinkaarilaskenta-loppuraportissa (2001).

Puun energiakäytön kasvaessa nimenomaan puupolttoaineen tuotannon ja käytön hiili-, ravinne- ja energiataseita pitäisi tarkastella koko tuotantojärjestelmän tasolla tehtaiden energian tuotantoon ja käyttöön liittyvät toiminnot ja prosessit huomioon ottaen.

Metsäsuunnittelun laajentaminen myös metsien ekologiaa muuttavaksi on ympäristöraportoinnin kehittämisen ohella toinen tärkeä tavoite. Suunnittelussa käytettäviin kasvumalleihin ja metsänkäsittelyohjelmiin voitaisiin liittää myös tärkeimpien ekotaseiden seurannassa tarvittavien perustietojen tuottaminen. Tässä hankkeessa selvitettiin puun eri osien hiili- ja typpipitoisuuksia, jotka liitettiin metsäsuunnittelujärjestelmällä tehtyihin esimerkkilaskelmiin. Tällä yksinkertaisella tavalla voidaan lisätä metsäsuunnitteluun puumäärien, tuottojen ja kustannusten rinnalle myös ilmaston muutoksen kannalta tärkeät alueelliset hiilitaseet.

Tässä hankkeessa kokeiltiin metsäsuunnittelujärjestelmän käyttöä hiilen ja typen virtojen sekä taseiden tarkastelussa Keski-Suomen yksityismetsistä saatujen suunnitteluaineistojen pohjalta. Samat lähestymistavat ja sovellukset ovat käytettävissä yritysten ja valtion omistamien metsien puuntuotantoa koskevissa tarkasteluissa. MELA-järjestelmä on useimpien metsäorganisaatioiden perustyökalu, ja tässä hankkeessa tehty valmistelutyö on myös tätä

kautta hyödynnettävissä. Puiden kasvuun, kuolemiseen ja lahoamiseen sekä metsien käsittelyyn liittyvien luonnonprosessien kuvaamista MELA-mallin yhteydessä tutkitaan parhaillaan Metsäntutkimuslaitoksen ja Joensuun yliopiston yhteishankkeessa.

3 METSIEN KEHITYSTÄ KUVAAVA PROSESSIMALLI T&K-TYÖN VÄLINEENÄ

3.1 Lähtökohdat ja tavoite

Metsien inventointiin ja tutkimuskoealojen mittaamiseen perustuvat kasvumallit ovat hyödynnettävissä silloin, kun metsien kasvun ja kehityksen edellytykset ja metsien käsittelytavat ovat muuttumattomia. Nämä perinteiset tilastolliset mallit antavat riittävän luotettavia ennusteita puumäärien kehityksestä aluetasolla olosuhteiden säilyessä ennallaan ja käytettäessä tutkittuja, jo vakiintuneita puuntuotannon menetelmiä. Pitemmällä tähtäimellä olosuhteet muuttuvat ja tilastollisten mallien tarkkuus vähenee.

Tilastollisten mallien vaihtoehtona ovat metsien luonnonprosesseja kuvaavat mallit, jotka kattavat puuston ja maaperän tärkeimmät metsän kasvuun ja kehitykseen vaikuttavat rakenteet ja mekanismit. Myös tämäntyyppisiä malleja laadittaessa hyödynnetään saatavilla olevaa tutkimustietoa metsien kasvusta ja kehityksestä, mutta niiden avulla voidaan tarkastella myös sellaisia käsittelytapoja, joista ei ole käytettävissä kokemusperäistä tietoa.

Koska prosessimallit sisältävät metsäekosysteemin tärkeimmät ainevirrat, ne ovat metsien kehitysdynamiikan tutkimukselle tärkeitä välineitä. Luonnonprosessien mallinnus tukee myös elinkaariarviointien näkökulmasta tehtävää metsien käsittelyn ympäristövaikutusten tutkimista.

Joensuun yliopiston metsäekologian tutkimusryhmän ja venäläisten tutkijoiden yhteistyöstä alkunsa saanut Impact-malli on metsien ainevirtojen dynamiikkaa jäljittelevä prosessimalli, joka ottaa huomioon metsien tyypin ja hiilen kierron sekä kasvupaikan perusominaisuudet. Puusto kuvataan koordinaatistossa yksittäisinä puuyksilöinä. Puiden latvukset ja juuristo kilpailevat keskenään. Puiden vanhentuessa ja kasvutilan vähentyessä syntyy karietta, ja jotkut alle jääneet latvuksiltaan supistuvat puuyksilöt kuolevat, mikä aiheuttaa muutoksia humuskerroksen ja maaperän hiili- ja typpipitoisuudessa (Chertov ym. 2001, Pitkänen ja Kellomäki 2001).

Metsäteho osallistui Impact-mallin metsien käsittelyyn ja puunkorjukseen liittyvien osien määrittelyyn. Ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli laatia metsikkötasolla toimiva sovellus käyttöliittymineen.

3.2 Aineistot

Impact-mallin toimivuutta testattiin eri pääpuulajeja edustavilla metsikköaineistoilla. Nuorten metsien kehitystä koskevia tietoja saatiin männiköiden osalta Kailan (1993) laajasta erillisinventointiin perustuvasta tutkimuksesta. Tämän tutkimuksen aineistoa kerättiin männyn istutuksesta, kylvöstä ja luontaisesta uudistamisesta eri tavoin muokatuilla mailla. Aineistosta hyödynnettiin Keski- ja Itä-Suomen taimikoita koskevia tietoja. Näiden mäntytaimikoiden kasvupaikoilla vuotuisen tehollisen lämpösumman vaihteluväli oli 1 000 - 1 199 d.d. °C.

Kailan (1993) aineistossa istutus oli suuntautunut käytäntöä vastaavasti viljavuudeltaan paremmille kasvupaikoille, pääosin kuitenkin kuivahkoille kankailla, ja luontaista uudistamista oli käytetty hyvin vähän tuoreilla kankailla. Kylvetyt mäntytaimikot olivat valtaosiltaan kuivahkoja kankaita, ja ne sijoittuivat viljavuusjakaumaltaan istutettujen ja luontaisesti uudistettujen välille.

Impact-mallin testauksissa männiköiden kasvupaikaksi määritettiin VT. Kaikkien taimikoiden iäksi asetettiin 15 vuotta, ja erilaisia uudistamistapoja vastaavat taimikoiden tilat tässä ikävaiheessa saatiin Kailan esittämistä tuloksista (taulukko 4). Eri uudistamismenetelmien alkupuustoon jäivät vaikuttamaan Metsätehon keräämien aineistojen mukaiset viljavuuserot.

Kuusikoiden osalta Impact-mallin testauksissa oli mukana ainoastaan yleisin perustapaus; MT-metsätyyppiä edustavan kasvupaikan uudistaminen istuttamalla kuuselle. Viljelykuusikon alkupuusto 15 vuoden iässä määritettiin Valkosen (1997) tutkimuksen perusteella (taulukko 4).

TAULUKKO 4 Metsikkötyyppien keskitunnukset simulointeja aloitettaessa

Puustotunnukset	Eri tavoin uudistetut VT-männiköt			MT-kuusikko
	Istutus	Kylvö	Luontainen	Istutus
Ikä	15	15	15	15
Tiheys, r/ha	2 128	2 125	2 384	2 080
Keskipituus, m	3,3	3,0	2,0	1,8
Pituuden keskihajonta, m	0,66	0,60	0,80	0,7
Keskiläpimitta (d _{1,3}), cm	5,1	4,4	2,4	1,6
Läpimitan keskihajonta, cm	1,7	1,5	1,4	1,3

Testauksessa käytettyjen eri metsikkötyyppien alkutilaa ei pyritty sovittamaan aivan tarkalleen vastaamaan Kailan ja Valkosen tutkimustuloksia. Tavoitteena oli kuitenkin, että metsiköiden keskitunnukset vastaisivat riittävästi todellista tilannetta, jotta suuntaa antavia päätelmiä voidaan perustella.

Impact-mallissa puiden paksuutta kuvataan rinnankorkeusläpimitan avulla. Taimikoissa osa puista on pituudeltaan alle 1,3 m. Keskitunnusten perusteella puita synnyttävä algoritmi hallitsee tämän tilanteen, ja alkupuustoon tulee myös lyhyitä puita.

Periaatteessa Impact-malliin voidaan antaa myös istutettua metsikköä vastaava puiden tilajärjestys. Tässä raportissa esitettävissä esimerkkisimuloinneissa käytettiin myös istutettujen metsien osalta satunnaista tilajärjestystä. Tämä johtui siitä, että tässä vaiheessa säännöllisemmässä asennossa kasvavien istutusmetsiköiden käsittelyohjelmien simulointeja ei ole vielä riittävästi testattu.

3.3 Menetelmät

Eri metsikkötyyppien kehitys- ja käsittelyohjelmat rakennettiin nykyisin sovellettavien metsien käsittelyperiaatteiden pohjalta (UPM-Kymmenen ohjeet). Vuorovaikutteista Impact-mallin ajotapaa hyödyntäen kaikille metsiköille tehtiin alaharvennuksia leimausrajojen ja pohjapinta-alaohjeiden mukaisesti.

Uudistushakkuut tehtiin nykysuositusten mukaan tai vaihtoehtoista pitempää kiertoaikaa käyttäen. Nykyohjeisiin nähden kiertoaikaa pidennettiin kussakin tapauksessa 20 vuotta. Näiden analyysien tavoitteena oli selvittää käytettävän kiertoajan vaikutus metsikkötyyppien korjattavissa oleviin puumääriin, hiili- ja typpitaseisiin sekä metsätöiden päästöihin. Pitempiä kiertoaikoja käytettäessä harvennusohjelmat olivat samoja kuin nykyisten käsittelyohjeiden mukaisissa tapauksissa.

Koska simuloinnit aloitettiin 15 vuoden ikäisistä puustoista lähtien, metsiköiden alkukehitys jouduttiin interpoloimaan syntymisvuoden ja aloitusiän välillä. Liitteessä 2 on esitetty esimerkki luontaisesti uudistetun VT-männikön käsittelyohjelmasta ja sen mukaisista hiili- ja typpimääristä puustossa ja maaperässä.

Metsiköiden käsittelyohjelmia esittävistä käyristä ja tiedoista on vaikea päätellä tulosten merkitystä käytännön metsätalouden kannalta. Tämä ongelma hoidettiin siten, että eri tavoin uudistettujen VT-männiköiden ja MT-kuusikoiden ikäluokittaisten pinta-alojen ajateltiin olevan normaalimetsää vastaavassa tilassa. Tässä tapauksessa ikäluokka määritettiin yhden vuoden kattavaksi, ja kaikkia ikävuosia vastaavien pinta-alojen oletettiin olevan samoja. Tätä menetelmää käyttäen voidaan tarkastella normaalimetsän mukaisessa tasapainotilassa olevien männiköiden ja kuusikoiden keskimääräisiä vuotuisia hehtaariohtaisia ainevirtoja ja -taseita.

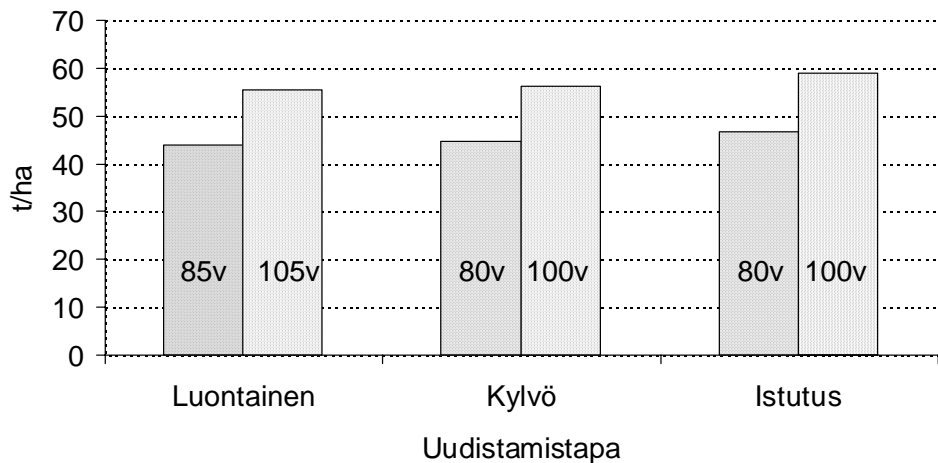
3.4 Hiilen ja typen määrät puustossa ja maaperässä

Normaalimetsäarakenteessa kasvavien VT-männiköiden kiertoaikojen pidentäminen kasvattaa keskimääräisiä hehtaarikohtaisia puustossa olevia hiili- ja typpimääriä oleellisesti. Kun kiertoaikaa lisätään 20 vuodella, luontaista poistumaa ei vielä esiinny. Mikäli tavoitteena on sitoa ilmaston muutosta aiheuttavia kaasuja metsiin, kiertoajan lisääminen vaikuttaa tavoiteltuun suuntaan (kuvat 14 ja 15).

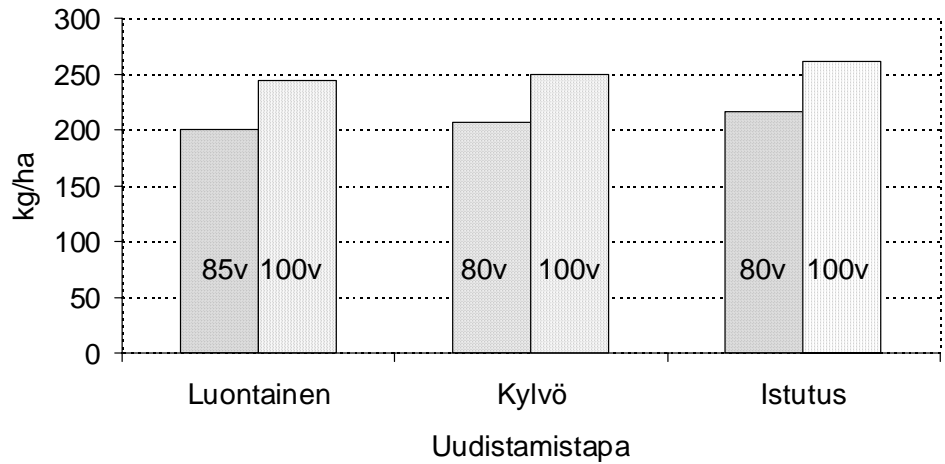
Hiili- ja typpivarastot näyttivät olevan suurimmillaan uudistettaessa istuttamalla. Luontaista uudistamista käytettäessä näiden aineiden keskimääräiset varastot ovat alhaisimmillaan. Kylvö taas sijoittuu näiden kahden eri uudistamistavan keskivälille. Metsien alkukehityksen nopeus riippuu mallille syöttötietoina annetusta uudistamismenetelmäkohtaisesta aloituspuustosta, ja tämä selittää varastotasoissa olevia eroja.

Kuvassa 14 esitetyssä hiilimäärässä ovat mukana rungot, oksat sekä puiden juuristo. Puun kaikissa komponenteissa hiilen osuus on noin puolet kokonaiskuivamassasta, joten puuaineen hehtaarikohtainen kokonaismäärä on kaksinkertainen esitettyihin lukuihin nähden.

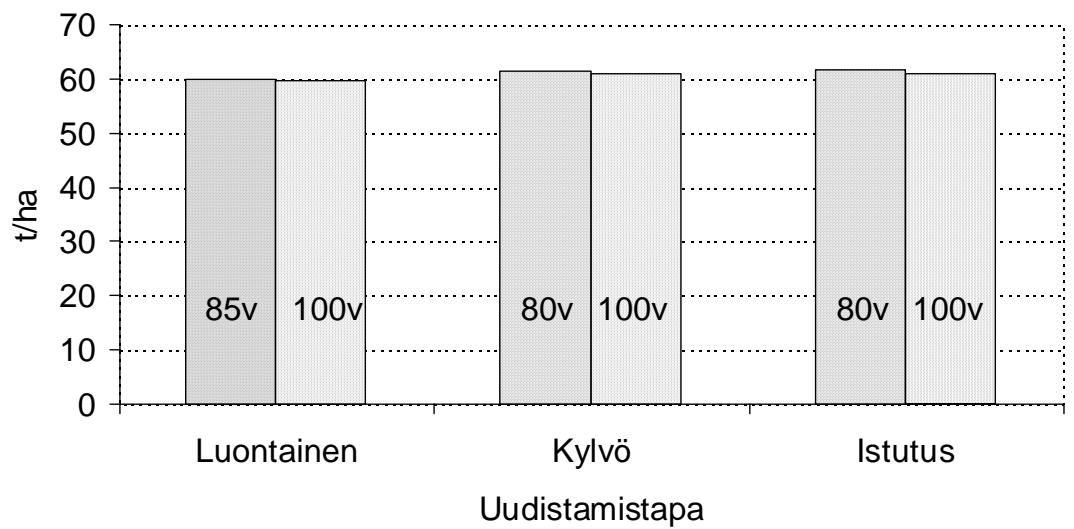
Toisin kuin puuston tapauksessa normaalimetsätilassa VT-männiköiden maaperän hiili- ja typpivarastot näyttävät pysyvän hyvin vakaina ja kiertoaikojen pituuksista riippumattomina. Eri kiertoaikavaihtoehtoja vastaavat metsien käsittelytavat poikkesivat tosin vain uudistushakkuun osalta toisistaan (kuvat 16 ja 17).



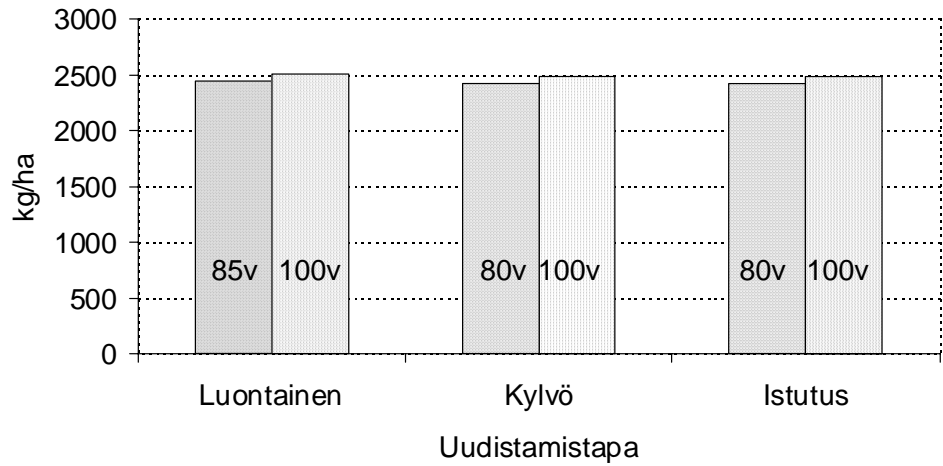
Kuva 14. Normaalimetsätilassa olevien VT-männiköiden puustoon keskimäärin sitoutunut hehtaarikohtainen hiilimäärä kahdessa eri kiertoaikavaihtoehdossa.



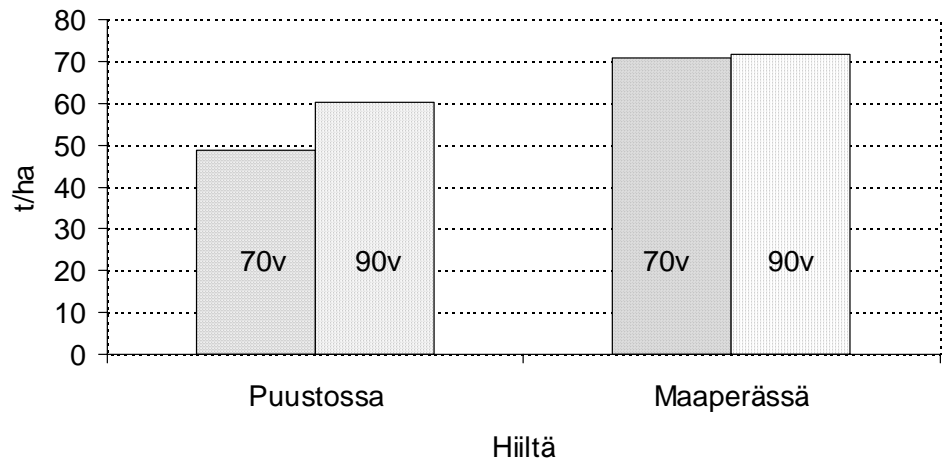
Kuva 15. Normaalimetsätilassa olevien VT-männiköiden puustoon keskimäärin sitoutunut hehtaarikohtainen typpimäärä kahdessa eri kiertoaikavaihtoehdossa.



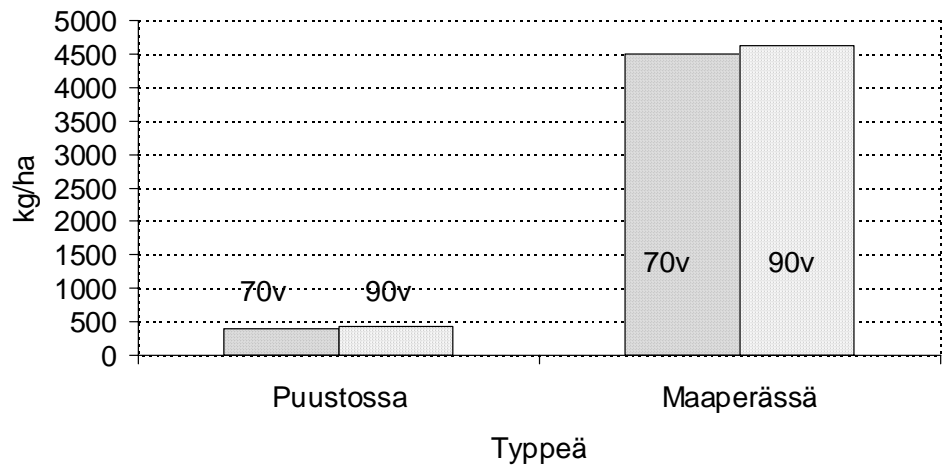
Kuva 16. Normaalimetsätilassa olevien VT-männiköiden maape-rään keskimäärin sitoutunut hehtaarikohtainen hiilimäärä kahdessa eri kiertoaikavaihtoehdossa.



Kuva 17. Normaalimetsätilassa olevien VT-männiköiden maaperään keskimäärin sitoutunut hehtaarikohtainen typpimäärä kahdessa eri kiertoaikavaihtoehdossa.



Kuva 18. Normaalimetsätilassa olevien MT-kuusikoiden puustoon ja maaperään sitoutunut hehtaarikohtainen hiilimäärä kahdessa eri kiertoaikavaihtoehdossa.

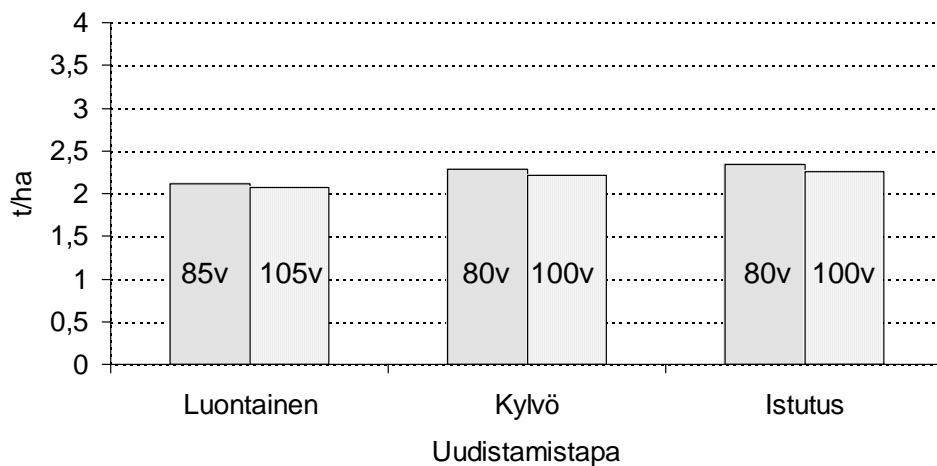


Kuva 19. Normaalimetsätilassa olevien MT-kuusikoiden puustoon ja maaperään sitoutunut hehtaarikohtainen typpimäärä kahdessa eri kiertoaikavaihtoehdossa.

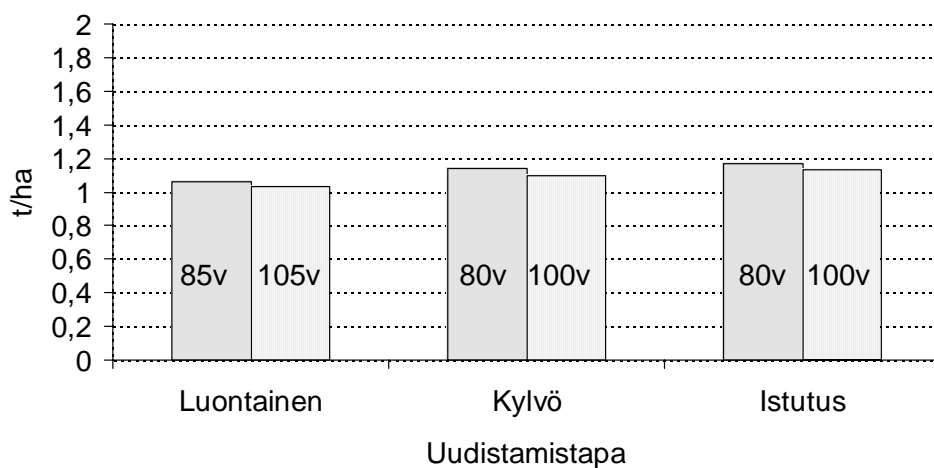
Normaalimetsätilassa olevat MT-kuusikot käyttäytyvät vastaavalla tavalla kuin VT-männiköt. Kuusen osalta ei päästy vertailemaan eri uudistamistapoja, mutta luontaista uudistamista käytettäessä kuusikoiden alkukehitys lienee hitaampaa kuin viljelymetsissä (kuvat 18 ja 19).

MT-kuusikoiden simuloinneissa Impact-malli tuotti verraten vähän luonnonpoistumaa pidennettäessä kiertoaikaa, mutta puiden kuolemisella oli kuitenkin merkitystä pitempää 90 vuoden kiertoaikaa käytettäessä. Kuusikoissa käytettiin kymmenen vuotta lyhempiä kiertoaikoja kuin männiköissä, ja näillä kiertoajoilla VT:llä kasvavien istutusmänniköiden ja MT-kuusikoiden keskimääräiset hehtaarikohtaiset puumäärät olivat lähellä toisiaan.

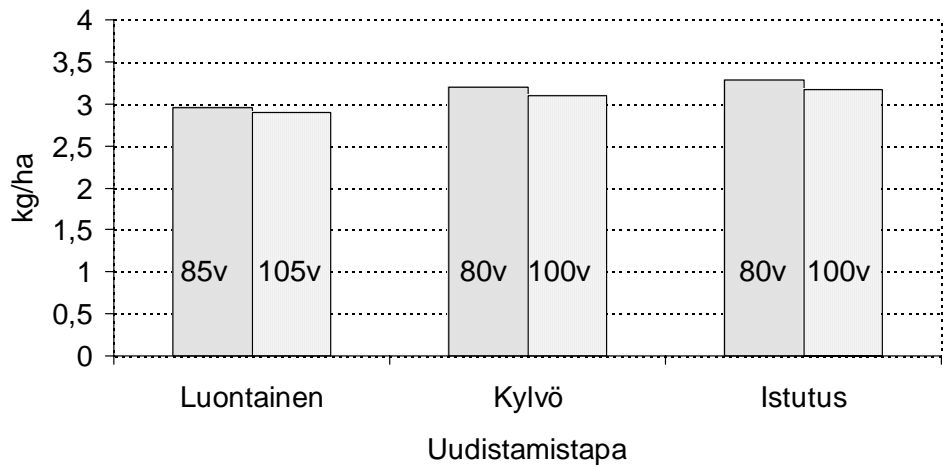
Kiertoaikojen pidentäminen pudottaa normaalimetsäarakenteessa olevien VT-männiköiden keskimääräistä vuotuista hehtaarikohtaista poistumaa samansuuntaisesti eri uudistamisvaihtoehdoissa (kuva 20). Erot puu-, hiili- ja typpimäärien keskimääräisissä vuotuisissa poistumisissa ovat kuitenkin verraten pieniä (kuvat 21 ja 22).



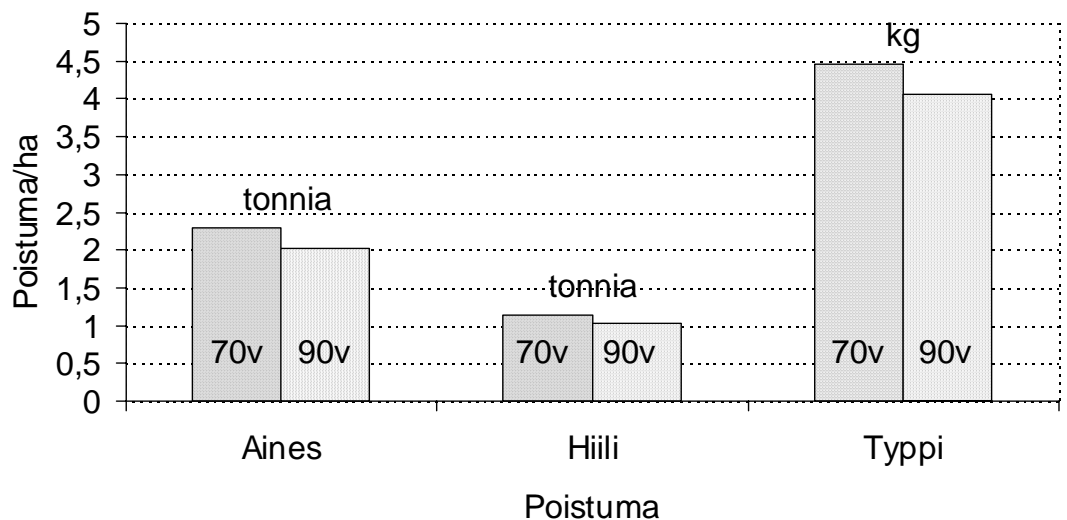
Kuva 20. Normaalimetsätilassa olevien VT-männiköiden keskimääräiset vuotuiset hehtaarikohtaiset ainespuun poistumat eri kiertoaikavaihtoehdoissa.



Kuva 21. Normaalimetsätilassa olevien VT-männiköiden keskimääräiset vuotuiset hehtaarikohtaiset ainespuun mukana poistuvat hiilimäärät eri kiertoaikavaihtoehdoissa.



Kuva 22. Normaalmetsätilassa olevien VT-männiköiden keskimääräiset vuotuiset hehtaarikohtaiset ainespuun mukana poistuvat typpimäärät eri kiertoaikavaihtoehdoissa.



Kuva 23. Normaalmetsätilassa olevien MT-kuusikoiden keskimääräiset vuotuiset hehtaarikohtaiset ainespuun poistumat sekä sitä vastaavat hiilen ja typen poistumat eri kiertoaikavaihtoehdoissa.

MT-kuusikoiden osalta vuotuiset hehtaarikohtaiset poistumat alenevat odotusten mukaisesti kiertoaikoja pidennettäessä. Kuusikoiden kiertoajan pidentämisestä johtuva luontainen poistuma näkyy myös pitkän kiertoajan ainepuun kertymässä (kuva 23).

3.5 Metsätöiden päästöt metsikkötyyppien eri kiertoaikavaihtoehdoissa

Joensuun yliopiston Impact-mallilla tehtyihin simulointeihin liitettiin metsätöiden päästöjen analyysi käyttäen samoja työkaluja kuin MELA-laskelmien yhteydessä. Korjuun tarkastelu perustui ensiharvennusten, muiden harvennusten sekä uudistushakkuiden runko- ja puutavaralajikertymiin. Koska tässä hankkeessa eri metsikkötyyppien kehityksen simulointi aloitettiin 15:sta ikävuodesta lähtien, tätä edeltävät metsänuudistamis- ja hoitotoimenpiteet otettiin huomioon nykykäytännön mukaisina.

Metsätöiden päästölaskelmat perustuivat samoihin normaalimetsämallin mukaisiin idealisoiituihin tasapainotilanteisiin, joita käytettiin myös puuston kehitystä analysoitaessa. Puunkorjuun ja metsänhoitotöiden ympäristökuormitusta tarkasteltiin näissä normaalimetsissä muodostuvina keskimääräisinä vuotuisina hehtaariohtaisina hiilen ja typen pakokaasupäästöinä (taulukko 5).

TAULUKKO 5 Normaalimetsien keskimääräiset korjuun ja metsänhoitotöiden päästöt metsikkötyypeittäin eri kiertoaikavaihtoehdoissa

Metsikkötyyppi	Kiertoaika, vuosia	CO ₂ -päästöt, kg/ha/v	NO _x -päästöt, kg/ha/v
VT-männiköt	85	26,9	0,394
Luontainen uudistaminen	105	24,2	0,355
VT-männiköt	80	30,5	0,449
Koneellinen kylvö	100	27,1	0,400
VT-männiköt	80	30,8	0,453
Istutus	100	27,3	0,403
MT-kuusikot	70	31,6	0,466
Istutus	90	26,0	0,384

Metsiköiden kiertoaikojen pidentäminen luonnollisesti vähentää vuosittaisia keskimääräisiä hehtaariohtaisia työkoneiden CO₂- ja NO_x-pakokaasupäästöjä männikoilla noin 10 %, ja kuusikoiden tapauksessa vaikutus on tätä suurempi. Näin vapautuvan hiilen määrä on hyvin pieni ainespuun mukana poistuvaan hiilimäärään verrattuna (ks. esim. kuva 23). Pakokaasupäästöjen tyyppiyhdisteiden määrä on kuitenkin hakkuupoistuman typpimäärän verrattuna jo samalla mittasteikolla näkyvä. Happi kuitenkin on mukana näissä määrissä.

Pakokaasupäästöt ovat suurimmillaan lyhyiden kiertoaikojen kuusikoissa. Luontaisesti uudistettujen männiköiden käsittelytoimenpiteet tuottavat alhaisimmat keskimääräiset päästöt.

3.6 Tarkastelu

Toteutetun tutkimuksen tavoitteena oli kehittää ja testata Impact-mallia metsikkötasolla käytettävissä olevien aineistojen pohjalta. Tulokset osoittivat, että tutkimuksen jatkaminen on hyvin perusteltua, ja mahdollisessa jatkohankkeessa mallin säätöjä täsmennetään metsikköaineistojen avulla samalla laajentaen simulointien käyttöaluetta. Lisäksi tarkoituksena on ollut käynnistää metsäalueiden kehitysvaihtoehtojen tutkimisessa tarvittavien lisäominaisuuksien ohjelmointityö.

Tässä tutkimusvaiheessa ei vielä tähdätty varsinaiseen eri uudistamistapojen vertailuun hiilen ja typen kierron näkökulmasta. Silti mallinnuksen tuottamat tulokset ja eri tavoin uudistettujen mäntymetsiköiden keskinäiset erot olivat loogisia. VT-männiköitä ei kuitenkaan voida verrata istutettuun MT-kuusikkoon, koska mallia ei ehditty vielä testata ja säätää riittävästi tämän osaprojektin aikana.

Kuusikoiden osalta olisi tärkeää tutkia hakkuutähteiden korjuusta aiheutuvia ravinnetasevaikutuksia. Tässä projektissa tehtiin pienimuotoisia laskennallisia kokeita tämänkin ongelman selvittämiseksi, mutta tulosten vahvistaminen vaatisi pitemmälle meneviä analyysejä.

Simulointitarkastelujen laatua arvioitaessa on otettava huomioon myös laskentatuloksien riippuvuus annetuista syöttötiedoista ja niiden oikeellisuudesta. Toisaalta testauksissa havaittiin, että malliin ohjelmoidut mekanismit oikaisevat syöttötiedoissa esiintyneitä vääristymiä jo muutaman vuoden kehitystä vastaavan simulointijakson aikana.

Luonnonprosesseja jäljittelevä malli on keskeinen väline tutkimuksessa. Mallinnuksen ja simulointien avulla voidaan ymmärtää metsäekosysteemin toimintaa syvällisemmin. Tätä tietoa voidaan hyödyntää myös tilastollisiin kasvumalleihin perustuvien, strategisissa analyyseissä käytettävien metsämallien sekä metsäsuunnittelujärjestelmien kehittämisessä.

4 PUURAAKA-AINEEN TUOTANTO TEOLLISUUDEN ELINKAARIARVIOINNEISSA

4.1 Tavoite

Suomessa massa- ja paperiteollisuus on osallistunut LCA:n kehittämiseen 1990-luvun alkupuoliskolta saakka. KCL ylläpitää ja edelleen kehittää teollisuudessa hyödynnettävää KCL-ECO-laskentaohjelmaa sekä EcoData-elinkaaritietopankkia. Näitä työkaluja käytetään mm. yritysten sisäisessä tuotevertailussa ja tuotannon eri vaiheiden kehittämisessä sekä markkinaviestinnässä.

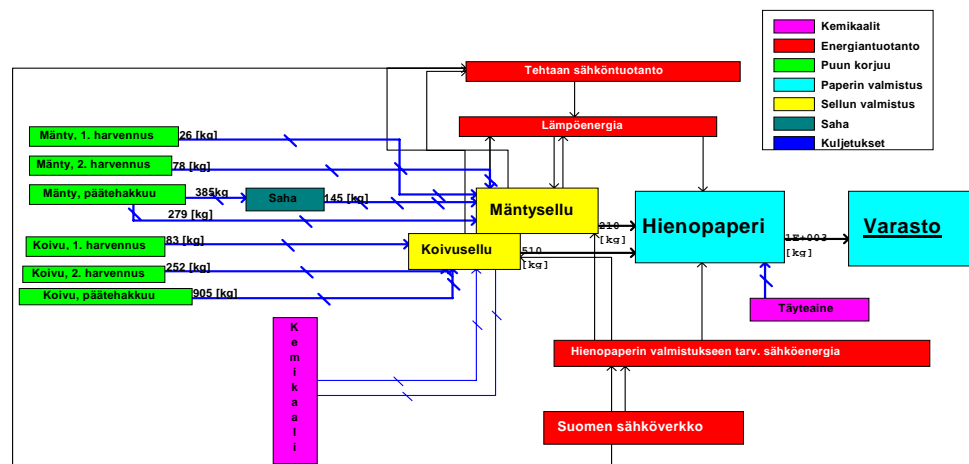
Metsätehon koordinoiman hankekokonaisuuden yhtenä keskeisenä tavoitteena oli liittää metsien käsittelyä ja hoitoa sekä puunhankintaa koskevat

elinkaariarvioinnin osat metsäteollisuuden ympäristölaskennan sovelluksiin. Tutkimuksen osatehtävänä Metsäteho ja KCL laativat yhteistyössä hienopaperin tuotantoa koskevan laskentaesimerkin, jonka avulla varmistettiin eri tuotantovaiheita koskevien tarkastelujen yhteensopivuus.

4.2 Sovellusesimerkki hienopaperin tuotannosta

Hienopaperin tuotannon ilmapäästöjä tarkasteltiin KCL-ECO-elinkaari-laskentaohjelmistolla. Hienopaperin tuotejärjestelmää kuvattiin yksinkertaistetusti. Tarkasteltava systeemi rajattiin siten, että laskentaan otettiin mukaan kaikki osaprosessit puunkorjuuvaiheesta tehtaan tuotevarastoon (kuva 24).

Energiantuotannossa polttoaineiden kaivanta ja jalostus rajattiin systeemin ulkopuolelle. Lisäksi mukana ovat vain tärkeimmät kemikaalit. Kuljetukset on merkitty virtauksiin vinoviivoin.



Kuva 24. Yksinkertaistettu esimerkki hienopaperin elinkaarianalysistä

Oheisessa esimerkissä metsien käsittelyä on tarkasteltu muita osaprosesseja yksityiskohtaisemmin. Tiedot ovat peräisin EcoDatasta, jonka puuraaka-aineen tuotantovaihetta koskevia osia Metsäteho ja KCL kehittivät yhteistyössä tämän projektin aikana.

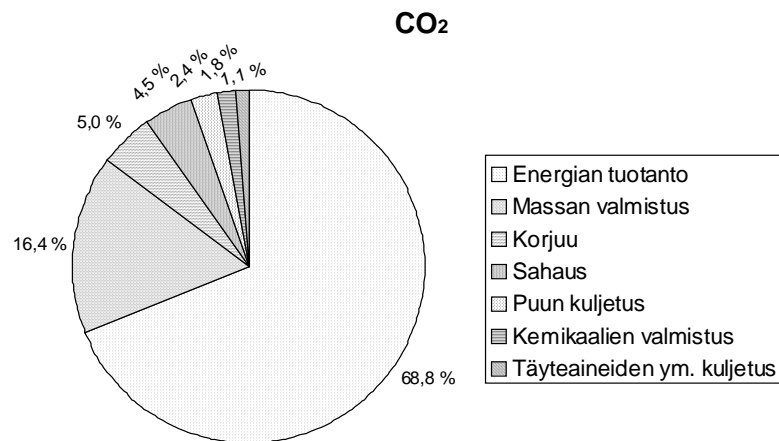
Tässä esimerkissä puunkorjuuta ja metsänhoitotöitä koskevat tiedot ovat peräisin Metsätehon osakkaiden kanssa kokoamista tilastoista vuodelta 1999, ja tiedot edustavat valtakunnallista tilannetta. Puunkorjuun päästöt on kohdistettu Metsätehossa kehitetyllä, aiheuttamisperiaatteen mukaisella menetelmällä kullekin tukki- ja kuitupuutavaralajille. Puunkorjuun tiedot sisältävät myös metsänhoitotöiden päästöt, jotka on kohdistettu tasaisesti kaikille korjatuille kuutiometreille ja puutavaralajeille. Puutavarakuljetukset metsästä tehtaille on kuvattu ja käsitelty erillisellä kuljetusmoduulilla, ja tässä tapauksessa tiedot ovat autokuljetuksen mukaisia.

Merkittävä osa massan valmistuksessa tarvittavasta havukuituraaka-aineesta saadaan sahoilta. Tässä esimerkkianalyysissä on mukana myös sahaus, sahahake ja puuraaka-aineen tuotantoon ja käsittelyyn liittyvät vaiheet kuten kuitupuullakin.

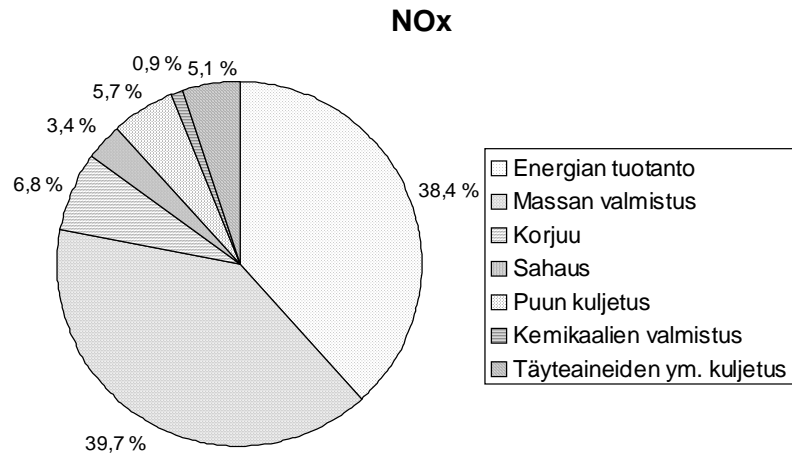
Kuvissa 25 ja 26 on esitetty hienopaperin tuotannon aiheuttamat CO₂- ja NO_x-päästöt ilmaan. Eri osaprosessien osuudet päästöistä laskettiin tehtaan portilla valmiina jatkokuljetusta odottavaa paperitonnia kohti, ja tarkastelu kattaa kaikki tätä edeltävät tuotantovaiheet.

Tehtaiden käyttämän energiantuotanto tuottaa noin 70 % hiilidioksidipäästöistä. Laskelmaan sisältyy myös ostettavan energian tuotannosta ja hankinnasta aiheutuvat päästöt. Seuraavaksi merkittävin CO₂-kuormituksen tuottaja on sellun valmistus. Korjuun ja siihen sisällytettyjen metsänhoitosekä metsänparannustoimenpiteiden osuus on yhteensä 5 %, ja raakapuun kuljetuksen osuus on 2,4 %. Täyteaineiden kuljetus ja kemikaalien valmistuksen vastaavat osuudet ovat vielä tätä pienempiä (kuva 24).

Hienopaperitonnin tuotantoketjun NO_x-päästöistä massan valmistusvaihe aiheuttaa 39,7 %. Energiantuotannon osuus on samaa suuruusluokkaa. Korjuun ja siihen liitettyjen muiden metsätöiden osuus on noin 7 %, ja puun kuljetuksen vastaava osuus noin 6 %. Koneiden dieselmoottorit aiheuttavat typpiyhdisteiden päästöjä, mikä on nähtävissä kuvassa 26 esitetyssä jakoumassa. Täyteaineita kuljetetaan laivoilla, ja myös meridieselkoneet tuottavat merkittäviä typpipäästöjä.



Kuva 25. CO₂-päästöjen suhteelliset osuudet koko tuotejärjestelmässä.



Kuva 26. NO_x-päästöjen suhteelliset osuudet koko tuotejärjestelmässä.

4.3 Tarkastelu

Esitetty sovellusesimerkki ei sisällä raaka-aineiden käytön tai päästöjen ympäristövaikutusten arviointia. LCAssa on kehitetty menetelmiä tätä tehtävää varten, mutta tulosten tulkinta ja vertailu perustuvat aina painotuksiin, ja yhtä oikeata lopputulosta ei ole.

Inventaarilaskentakin on käyttökelpoinen työkalu puuraaka-aineen tuotannon eri vaiheiden energiankulutuksen ja päästöjen seurannassa. Metsien luonnonprosessien sekä maankäytön aiheuttaman ympäristökuormituksen sisällyttäminen mukaan tarkasteltavaan systeemiin lisää tuotantoketjun metsien käyttöön liittyvän alkuvaiheen merkitystä puu- ja paperituotteiden elinkaariarvioinneissa.

5 PÄÄTELMÄT

Metsäteollisuuden ja -talouden ympäristökuormituksen tarkastelu elinkaariarvioinnin lähestymistapaa soveltaen on haasteellinen tehtävä varsinkin, jos metsien kehitykseen ja käsittelyyn liittyvät luonnonprosessit otetaan mukaan osaksi inventoitavaa ja mallinnettavaa tuotantojärjestelmää. Sen sijaan

puuraaka-aineen käsittelyn koneellistetut työvaiheet sekä metsien hoitoon ja parannukseen liittyvät työlajit voitiin kuvata tavanomaisesti teollisten tuotantoprosessien tapaan.

Konetöiden energian kulutusta ja päästöjä koskevat tiedot eivät ole nykyisellään kovin täsmällisiä, ja puutteiden poistaminen edellyttää kokeellisia

tutkimuksia sekä tietojen vaihtoa hankintaorganisaatioiden ja alihankkijoiden välillä. Teknologisessa tutkimuksessa ja kehittämisessä tarvittaisiin tietoja toimintaolosuhteiden ja käytettävien tekniikoiden vaikutuksista ympäristökuormitukseen.

Metsävarojen käyttöaste suhteessa kasvuun, metsien uudistuminen, harvennuskertojen määrä ja metsiköiden kiertoaikojen pituudet sekä ainespuuksi ja polttoaineeksi korjattavan raaka-aineen talteenoton tarkkuus vaikuttavat hiilen sidontaan ja vapautumiseen. Nämä ilmiöt ovat monimutkaisesti mallinnettavia, jos maaperän prosessit, ravinnekierrot ja ravinteiden huuhtoutuminen halutaan ottaa huomioon. Sen sijaan puuston hiilivarastoa voidaan seurata ja ennustaa jo käytössä olevilla metsäsuunnittelun järjestelmillä. Alueelliset ekotaseet ovat verraten helposti tuotettavissa olemassa olevia malleja kehittämällä. Pitkän aikavälin tarkasteluissa elinkaariarvioinnin tyyppinen kohdentaminen yksittäisille tuotteille ei ole olennaista.

Hiilen ja typen kierron kattaville prosessipohjaisille metsikkösimulaattoreille on käyttöä metsien käsittelyohjelmien vertailussa. Puuaineen ominaisuuksien kehitys ja sen taloudellinen merkitys sekä metsäteknologinen näkökulma pitäisi kuitenkin kyetä ottamaan nykyistä paremmin huomioon.

Erilaisia strategioita, toimintamalleja, menetelmiä ja tekniikoita koskevan ympäristökuormituksen rinnalla tulisi ottaa huomioon taloudelliset ja yhteiskunnalliset vaikutukset. Ekonominen ja yhteiskuntavastuullinen näkökulma ei ole kuitenkaan uusi asia metsätaloudessa. Valmiudet ja osaaminen tällä alueella ovat perinteisesti vahvoja.

Projektin avulla saatiin käynnistettyä aihealueella tutkimus- ja kehittämissyö, joka ylittää perinteiset tieteiden ja organisaatioiden väliset rajat, ja aloitettua yhteistyötä kannattaisi jatkaa. Näin selvittää pienimmillä kokonaisresursseilla ja tulokset ovat myös laadukkaampia verrattuna siihen, että jokainen mukana oleva taho yrittäisi hallita yksinään mahdollisimman suurta osaa koko ongelmakentästä.

VIITTEET

- Chertov, O., Kellomäki, S., Komarov, A., Kolström, M., Pitkänen, S., Srandman, H. ja Zudin, S.** 2001. Modelling the long-term dynamics of populations and communities of trees in boreal forests based on competition for light and nitrogen. Käsikirjoitus.
- Kaila, S.** 1993. Metsänuudistamisen tuloksen määrittäminen ja männyn uudistamisen tuloksia. Metsätehon tiedotus 409.
- Kaila, S., Imponen, V. ja Pitkänen, S.** 2001. Integrating foresry into the life cycle assessment (LCA) of forest products. Metsätehon raportti 116.
- Oijala, T. ja Terävä, J.** 1994. Puunkorjuun kustannusten jakaminen puutaralajeille. Metsätehon katsaus 12/1994.
- Pitkänen, S. ja Kellomäki, S.** 2001. Interaction between carbon accumulation and habitat diversity, with implications for the sustainable management of forest resources. Käsikirjoitus.
- Valkonen, S.** 1997. Viljelykuusikoiden alkukehityksen malli. Metsätieteen aikakauskirja 3/1997.
- Tomppo, E., Katila, M., Moilanen, J., Mäkelä, H. ja Peräsaari, J.** 1998. Kunnittaiset metsävaratiedot 1990 – 94. Metsätieteen aikakauskirja 4B/1998.
- Örn, J.** 2001. Puuntuotannon, puunkorjuun ja kaukokuljetuksen energian ja käyttöaineiden kulutuksen sekä päästöjen laskentamenetelmä. Metsätehon raportti 124.
- Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 2001. Elinkaarilaskennan kehittäminen ja hyödyntäminen yksityismetsätaloudessa. Loppuraportti.

KIRJALLISUUS

- Karjalainen, T. ja Asikainen, A.** 1996. Greenhouse gas emissions from the use of primary energy in forest operations and long-distance transportation of timber in Finland. *Forestry*, Vol. 69. No. 3, 1996.
- Härkönen, T.** 1998. Metsätalouden ekotase – laskentaohjelma ja sen testaus Enso Oyj:n Karjalan hankinta-aleen tiedoilla. Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 74

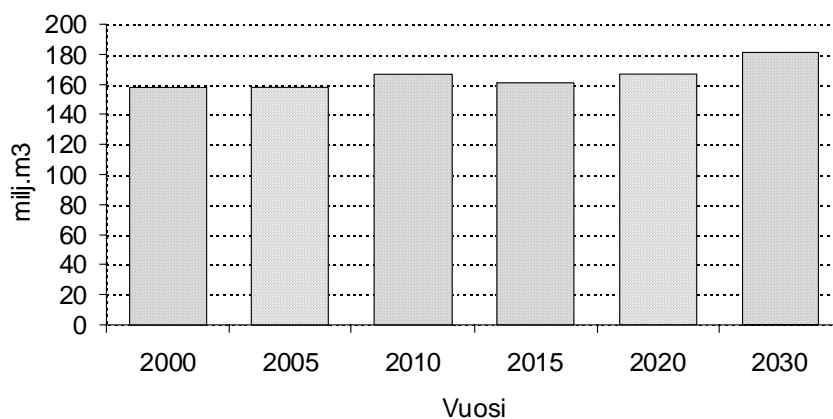
Liitetaulukko 1. Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsien metsäsuunnitelmien mukaiset hakkuut vuosina 2000 – 2010 sekä MELA-optimoinnin tuottamat hakkuut vuosina 2010 – 2030 hakkuutavoittain ja puutavara-lajeittain. Luvut ovat summa-arvoja koko viiden tai kymmenen vuoden jaksolta.

	mät	kut	let	tukki yht.	mäk	kuk	lek	kuitu yht.	yhteensä
ensiharvennus									
2000-2005	1 032 471	1 231 591	171 133	2 435 195	1 043 247	553 825	526 357	2 123 428	4 558 623
2005-2010	888 617	786 799	116 577	1 791 992	904 706	279 346	318 653	1 502 705	3 294 697
2010-2015	439 348	645 247	91 366	1 175 961	348 025	254 721	215 825	818 571	1 994 532
2015-2020	503 511	251 391	68 377	823 278	489 852	107 148	176 584	773 583	1 596 861
2020-2030	370 825	154 761	54 350	579 936	339 764	53 479	123 094	516 337	1 096 273
muu harvennus									
2000-2005	1 361 526	1 624 107	225 674	3 211 307	1 375 736	730 333	694 110	2 800 179	6 011 486
2005-2010	917 944	812 766	120 424	1 851 134	934 564	288 565	329 170	1 552 298	3 403 432
2010-2015	2 967 713	4 358 518	617 159	7 943 390	2 350 844	1 720 590	1 457 856	5 529 290	13 472 679
2015-2020	1 996 484	996 795	271 122	3 264 401	1 942 324	424 856	700 177	3 067 357	6 331 758
2020-2030	4 590 562	1 915 833	672 820	7 179 216	4 206 049	662 037	1 523 823	6 391 910	13 571 125
uudistushakkuu									
2000-2005	2 631 437	8 620 646	569 157	11 821 240	2 658 902	3 876 554	1 750 565	8 286 021	20 107 261
2005-2010	2 209 931	8 901 794	385 332	11 497 057	2 249 943	3 160 501	1 053 275	6 463 718	17 960 775
2010-2015	4 075 953	10 585 979	807 539	15 469 471	3 228 725	4 178 972	1 907 573	9 315 271	24 784 742
2015-2020	3 493 992	6 667 949	677 669	10 839 610	3 399 206	2 842 026	1 750 095	7 991 327	18 830 937
2020-2030	7 096 986	16 185 039	1 742 256	25 024 281	6 502 530	5 592 918	3 945 915	16 041 363	41 065 644
yhteensä									
2000-2005	5 025 435	11 476 343	965 965	17 467 743	5 077 884	5 160 712	2 971 032	13 209 628	30 677 371
2005-2010	4 016 492	10 501 358	622 333	15 140 183	4 089 212	3 728 411	1 701 098	9 518 721	24 658 904
2010-2015	7 483 013	15 589 744	1 516 064	24 588 821	5 927 595	6 154 282	3 581 254	15 663 131	40 251 953
2015-2020	5 993 987	7 916 135	1 017 167	14 927 289	5 831 381	3 374 030	2 626 856	11 832 267	26 759 556
2020-2030	12 058 373	18 255 633	2 469 427	32 783 432	11 048 343	6 308 434	5 592 832	22 949 610	55 733 042

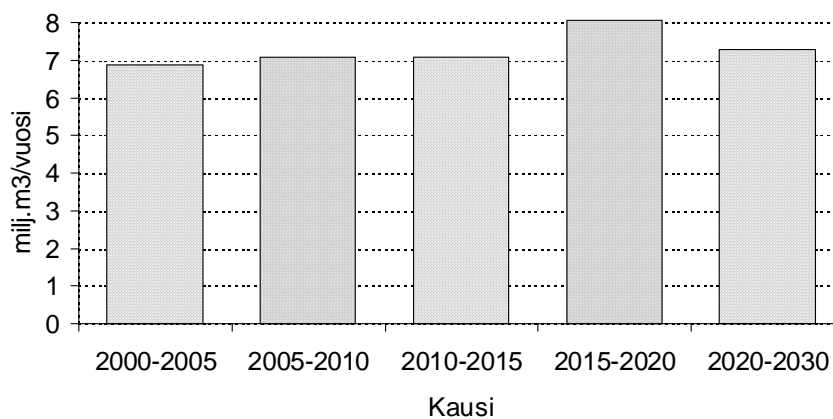
Liitetaulukko 2. Keski-Suomen metsäkeskuksen yksityismetsien metsäsuunnitelmien mukaiset metsänhoito- ja perusparannustyöt vuosina 2000 – 2010, MELAn tuottaman simuloinnin mukaiset hakkuualan raivaus, muokkaus, istutus ja taimikonhoitotyöt vuosina 2010 – 2030 sekä *Huomisen metsät* -työohjelman tavoitteista johdetut nuoren metsän kunnostus, lannoitus ja kunnostusojitus sekä metsäteiden rakennus- ja perusparannusmäärät. Luvut ovat summa-arvoja koko viiden tai kymmenen vuoden jaksolta.

	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020	2020-2030
ha					
Hakkuualan raivaus	6 358	1 708	19 157	37 915	55 087
Äestys, laikutus, koneellinen kylvö	91 141	52 237	79 558	63 712	119 252
Mätästy	20 804	12 313	17 807	14 459	26 185
Istutus	94 288	53 448	75 804	47 815	95 339
Taimikonhoito	229 779	137 725	168 493	106 669	227 784
Nuoren metsän kunnostus	39 170	39 170	39 170	39 170	78 340
Metsänlannoitus	7 790	7 790	7 790	7 790	15 580
Kunnostusojitus	36 750	36 750	36 750	36 750	73 500
km					
Metsäteiden rakennus	365	365	365	365	730
Metsäteiden perusparannus	465	465	465	465	930
Metsäteiden kunnossapito	15500	15500	15500	15500	31000

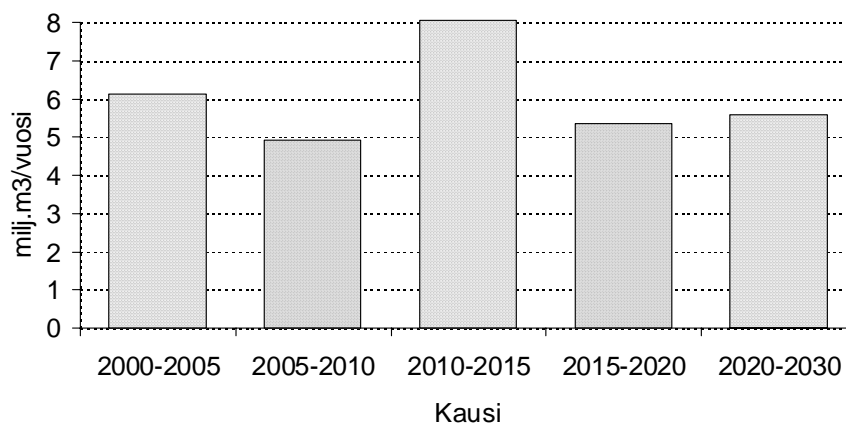
0,8 Äestysten ja laikutuksen osuus maanmuokkauksesta.
0,9 Koneellisen kylvön osuus.
6200 Metsäteiden kunnossapito vuosittain joka toiselle metsätiekilometrille, kokonaiskilometrimäärä.



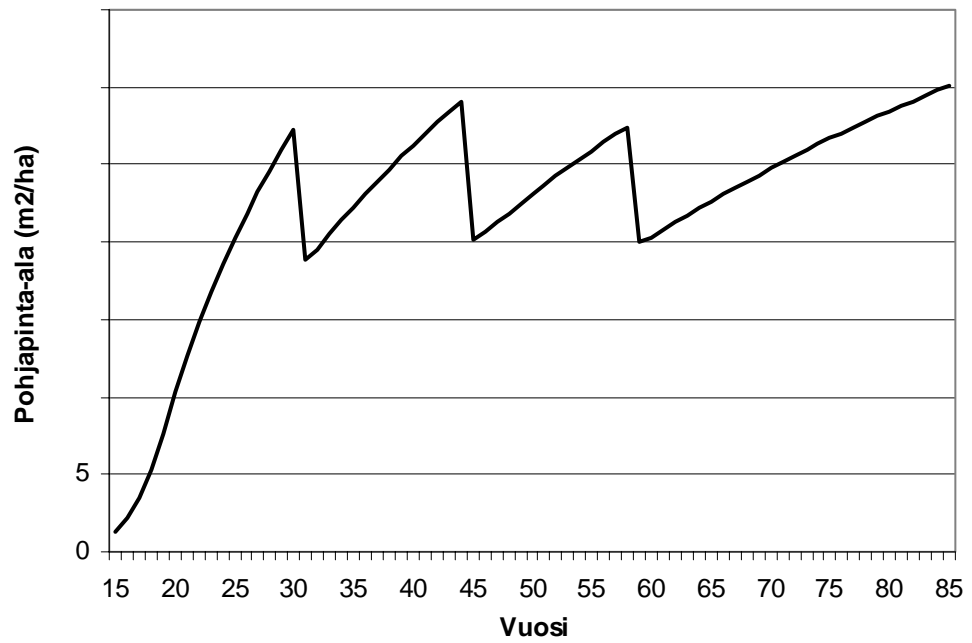
Liitekuva 1. Keski-Suomen yksityismetsissä kasvamassa oleva puusto suunnittelujaksojen päättymisvuosina.



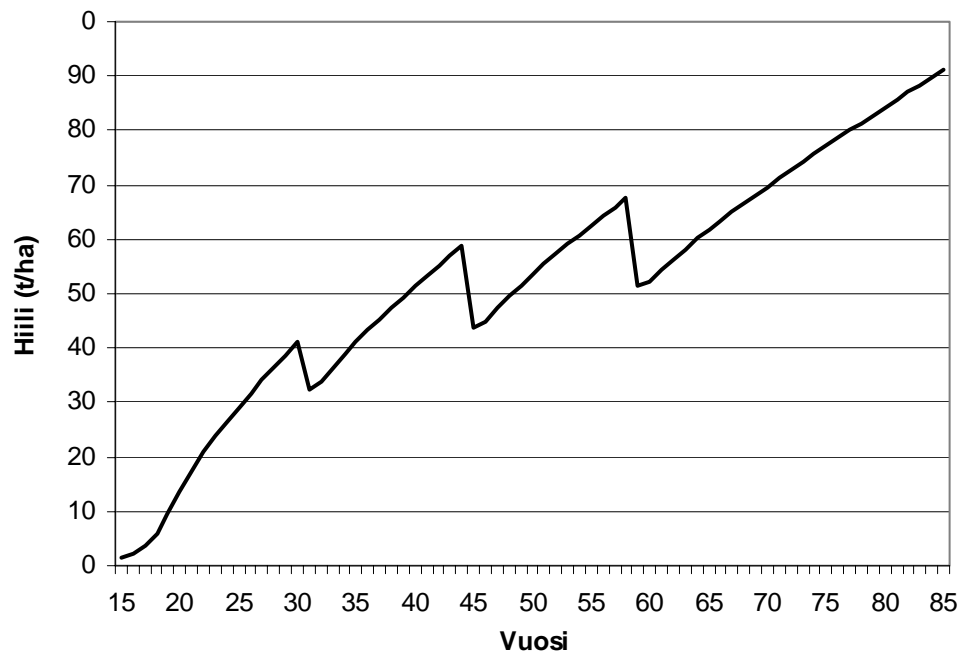
Liitekuva 2. Keski-Suomen yksityismetsien vuotuinen runkopuun kasvu MELA-laskelmien mukaan eri suunnittelukausina.



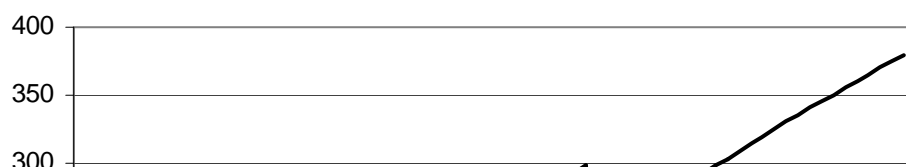
Liitekuva 3. Keski-Suomen yksityismetsien vuotuinen hakkuusuunnite MELA-laskelmien mukaan eri suunnittelukausina.



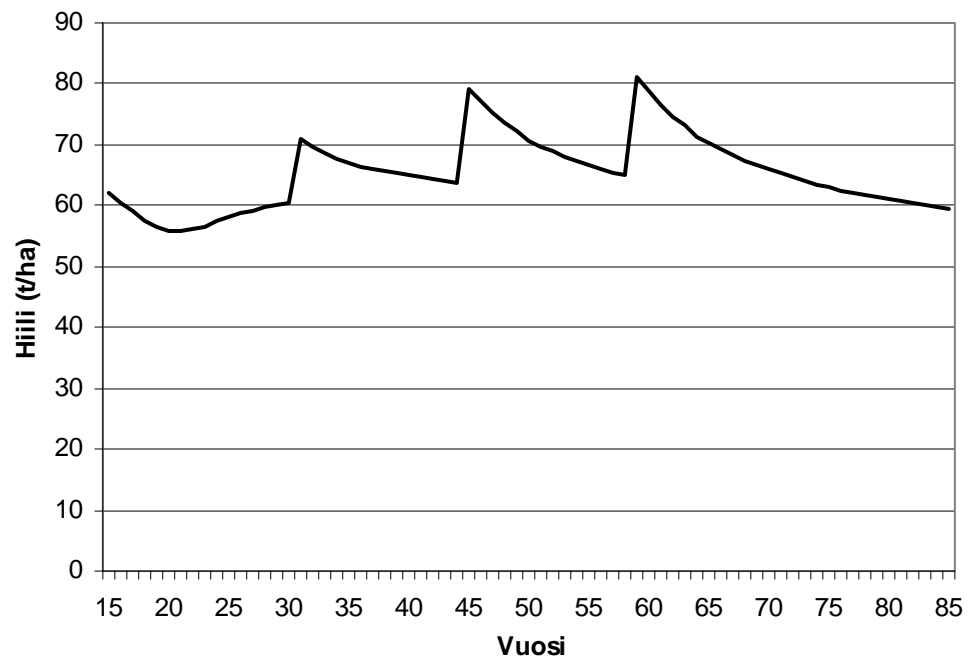
Liitekuva 4. Luontaisesti uudistetun VT-männikön pohjapinta-alan kehitys. Metsikön kiertoaika 85 vuotta.



Liitekuva 5. Luontaisesti uudistetun VT-männikön puuston hiilir
Metsikön kiertoaika 85 vuotta.

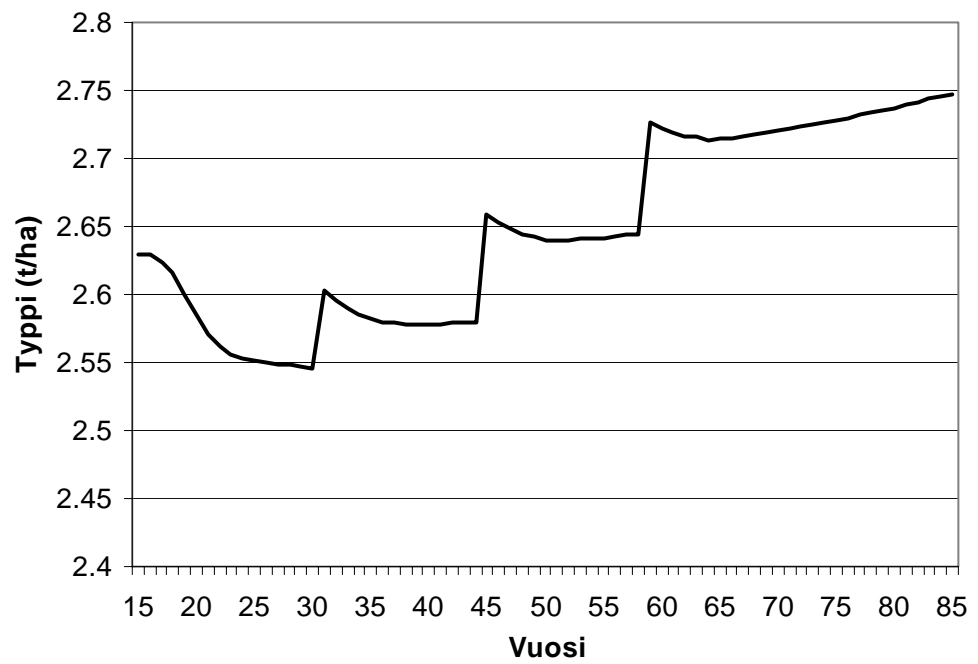


Liitekuva 6. Luontaisesti uudistetun VT-männikön puuston typpimäärät.
Metsikön kiertoaika 85 vuotta.



Liitekuva 7. Luontaisesti uudistetun VT-männikön maaperän hiilimäärät.
Metsikön kiertoaika 85 vuotta.

LIITE 2
3 (3)



Liitekuva 8. Luontaisesti uudistetun VT-männikön maaperän typpimäärät. Metsikön kiertoaika 85 vuotta.