

Puun käyttö ja hiilitasapaino

Tutkimus puun käytön vaikutuksesta hiilen
kiertokulkuun Suomessa 1990

Heikki Seppälä ja Virpi Siekkinen



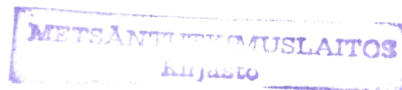
Puun käyttö ja hiilitasapaino

Tutkimus puun käytön vaikutuksesta hiilen
kiertokulkuun Suomessa 1990

Heikki Seppälä ja Virpi Siekinen



Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 473
Metsien käytön tutkimusosasto
Helsinki 1993



H. Seppälä ja V. Siekkinen 1993. Puun käyttö ja hiilitasapaino. Tutkimus puun käytön vaikutuksesta hiilen kiertokulkuun Suomessa 1990. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 473. 54 s. ISBN 951-40-1321-2. ISSN 0358-4283.

Julkaisussa esitetään puuainestilinpitoon perustuva puun käytön hiilitilinpito Suomessa vuodelle 1990. Puuainestilinpito ja puun käytön hiilitilinpito ovat luonnonvaraintilinpidon osia. Luonnonvaraintilinpito on kansantalouden tilinpidon laajennus, joka tarkastelee kansantaloutta sekä sen voimavarojen käyttöä ympäristötalouden näkökulmasta. Nyt esiteltävä puun käytön hiilitilinpito on tiettävästi ensimmäinen laatuaan maailmassa.

Puunkäytön hiilitilinpidon lisäksi julkaisussa analysoidaan elinkaari-analyysin avulla hiilen sitoutumista ja vapautumista Suomessa vuonna 1990 valmistetuissa metsäteollisuustuotteissa sekä muussa kuin teollisessa puunkäytössä aina vuoteen 2040. Tulosten mukaan käyttöön tulevan puun elinkaari on keskimäärin verrattain lyhyt. Jo viidessä vuodessa puuhun sitoutuneesta orgaanisesta hiilestä lähes neljä viidesosaa vapautuu hiilidioksidina takaisin ilmakehään. Toisaalta sen jälkeen viimeinen viidennes hiilestä vapautuu hitaasti, useiden vuosikymmenien kuluessa. Puurakenteisiin puun orgaaninen hiili varastoituu jopa vuosisadoiksi.

Metsäteollisuus vastaa 85 prosentista puun kokonaiskäytöstä Suomessa ja viennin osuus metsäteollisuuden tuotannon arvosta on kolme neljäsosaa. Siitä huolimatta vientituotteisiin sitoutuu vain vajaa puolet käytetyn puun biomassasta ja siten puuhun sitoutuneesta orgaanisesta hiilestä. Tämä johtuu siitä, että metsäteollisuuden käyttämästä puusta ohjautuu lopulta runsas kolmannes polttoon teollisuuden tuotannossaan käyttämäksi energiaksi. Kaiken kaikkiaan käytetyn puun sisältämästä orgaanisesta hiilestä puolet vapautuu kotimaassa ja puolet ulkomailla, lähinnä EY:n alueella.

Avainsanat: Puun käyttö, puuainestilinpito, hiilidioksiditasapaino, kasvihuoneilmiö.

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. Hyväksynyt: Risto Seppälä, tutkimusjohtaja 27.9.1993.

Kirjoittajien yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, metsien käytön tutkimusosasto, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puhelin (90) 857 05 754. Fax (90) 625 308.

Jakelu: Metsäntutkimuslaitos, metsien käytön tutkimusosasto, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puhelin (90) 857 05 743/Helena Ahola.

Kansi: Stetson Design/Heka & HSe

SISÄLLYS

ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO	5
1.1 Metsäsektori ja tuntemattomat hiilen nielut	5
1.2 Tutkimustehtävä	7
2 METSÄT, PUUN KÄYTTÖ JA HIILITASAPAINO	9
2.1 Metsäsektori ja hiilen kiertokulku	9
2.2 Metsäsektori ja kasvihuoneilmiö	11
2.3 Suomi, metsäsektori ja hiilitasapaino	13
3 HIILEN SITOUTUMINEN PUUVAROJEN KÄYTTÖÖN SUOMESSA.....	16
3.1 Puuainestilinpidon yhteys puun käytön hiilitilinpitoon	16
3.2 Elinkaarianalyysi	17
3.3 Puunkäytön hiilitilinpito	20
3.3.1 Puutaseen hiilisisältö	20
3.3.2 Hiilen sitoutuminen eri toimialoille	21
3.3.3 Toimialojen väliset hiilivirrat	23
3.4 Hiilen kiertokulku puunkäytössä	25
3.4.1 Sahatavaran valmistus	25
3.4.2 Puumassan ja paperin valmistus	28
3.4.3 Vanerin valmistus	31
3.4.4 Lastu- ja kuitulevyjen valmistus	34
3.4.5 Koko metsäteollisuus	36
3.4.6 Muu kuin teollisuuden puunkäyttö	36
3.4.7 Puun kokonaiskäyttö	37
4 HIILITASE, METSÄSEKTORI JA KANSANTALOUS	40
4.1 Puun energiakäyttö	40
4.2 Hiilidioksidivero ja metsäsektori	42
4.3 Metsäsektori ja ilmastopöimukset	46
5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	48
LÄHDELUETTELO	50
Liitteet.....	52

Alkusanat

Tämä raportti on osa Metsäntutkimuslaitoksen ja Tilastokeskuksen yhteistutkimushanketta ”Puuainestilinpidon kehittäminen ja metsäsektorin mallittaminen”, jonka päärahoittajana on maa- ja metsätalousministeriö. Myös Metsämiesten Säätiö on tukenut hanketta taloudellisesti. Hankkeen yhtenä tavoitteena Metsäntutkimuslaitoksessa on kansantalouden tilinpidon rakenteen mukaisen puunkäytön hiilitilinpidon laatiminen. Sen pohjalle tullaan rakentamaan laskentajärjestelmä, jonka avulla metsäekosysteemin varastoiman orgaanisen hiilen sitoutumista puun käyttöön voidaan jäljittää ja analysoida.

Sekä puuainestilinpito että hiilitilinpito ovat osa luonnonvaraintilinpiitoa. Luonnonvaraintilinpidosta on Suomessa tarkoitus tehdä osa koko kansantalouden tilinpiitoa, jolloin luonnonvarojen merkitys tulee huomioduksi mm. kansantulolaskelmissa mahdollisimman oikean arvon mukaisesti.

Tässä raportissa esitellään puun käytön hiilitilinpito Suomessa vuodelle 1990. Lisäksi esitetään alustavia laskelmia metsätuotteisiin sitoutuneen hiilen kiertokulusta ja vapautumisesta hiilidioksidina takaisin ilmakehään vuoteen 2040. Edelleen arvioidaan puunkäytön kansantaloudellisia vaikutuksia hiilitaseen näkökulmasta. Tarkasteltavina ovat puun energiakäyttö, mahdolliset hiilidioksidiverovaikutukset sekä ilmastopimukset.

MMT Pekka Kauppi, VTK Leo Koltola, Ph.D Jari Kuuluvainen, FT Ilmo Mäenpää, MML Heikki Pajuoja, Professori, MMT Matti Palo ja Professori, VT Risto Seppälä ovat lukeneet käsikirjoituksen sekä esittäneet siihen rakentavia kommentteja ja parannusehdotuksia. Helena Ahola ja Pirjo-Riitta Lind ovat huolehtineet julkaisun viimeistelystä ja painoasusta. Tekijät haluavat kiittää edellä mainittuja ja kaikkia muita tutkimuksen toteutumiseen vaikuttaneita.

Helsingissä syyskuussa 1993

Heikki Seppälä
Tutkija

Virpi Siekkinen
Tutkija

1 Johdanto

1.1 Metsäsektori ja tuntemattomat hiilen nielut

Kiinnostus ilmakehän hiilitasapainon tutkimiseen on lisääntynyt sitä mukaa, kun kasvihuoneilmiöön liittyvää ilmastomuutosta on alettu pitää yhtenä maapallon tulevaisuuden vakavimmista uhkatekijöistä. Yli puolen kasvihuoneilmiön voimistumisesta on arvioitu aiheutuvan hiilidioksidin määrän lisääntymisestä ilmakehässä (Komiteanmietintö 1991:21). Metsät puolestaan sitovat tehokkaasti ilmakehän hiilidioksidia. Valtamerten ohella ne ovat maapallon tärkein hiilen nielu ja varasto.

Maapallon hiilitaseeseen lasketaan yleensä hiilidioksidin päästöt energiantuotannosta ja teollisuudesta sekä hiilidioksidin sitoutuminen kasvillisuuteen ja meriin. Taselaskelmat ovat kuitenkin viime vuosiin saakka olleet kovin epätäydellisiä. Arvioitu hiilen sitoutuminen maapallolle on ollut 1,2 miljardia hiilitonnia eli lähes viidenneksen hiilen päästöjä pienempi (Detwiler & Hall 1988). Hiiltä sitoutuu näin ollen yhden tai useamman tuntemattoman nielun kautta jonnekin maapallolle.

Tarkentuneet tiedot boreaalisen ja lauhkean ilmastovyöhykkeen metsävarojen lisääntymisestä ovat saaneet tutkijat pohtimaan, mikä merkitys näillä metsillä on maailman hiilitasapainossa. Kauppi ym. (1992) ovat arvioineet Euroopan runkopuuvarojen lisääntyneen 1970- ja 1980-luvulla keskimäärin 250 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, mikä vastaa noin 50 miljoonaa tonnia hiiltä. Runkopuun lisäksi metsäekosysteemin muuhun biomassaan he arvioivat sitoutuvan vuosittain 20–55 miljoonaa tonnia hiiltä. Yhteensä Euroopan metsäekosysteemi sitoisi siten nykyisellään vuosittain 70–105 miljoonaa hiilitonnia, mikä vastaa 6–9 prosenttia puutuvista hiilen nieluista maapallon hiilitaseessa. Kauppi ja Tomppo (1993) arvioivat Euroopan metsäekosysteemin sitoneen hiiltä vuonna 1991 peräti 120 miljoonaa tonnia.

Sedjo (1992) otti laskelmissaan huomioon Euroopan lisäksi myös muut suuret pohjoiset metsäalueet eli entisen Neuvostoliiton sekä USA:n ja Kanadan. Näiden puuston ja muun metsäekosysteemin biomassan kasvun lisäyksen hän arvioi sitovan hiiltä lähes 700 miljoonaa tonnia vuodessa. Sedjon arvio selittäisi siis noin 60 prosenttia tunnistamattomista hiilen nieluista. Hallitusten välisen ilmastopaneelin, IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) tuorein arvio pohjoisen metsistä hiilen sitojana yltää jopa 900 miljoonaan tonniin. Näin jo lähes kolme neljännestä tähän saakka tietyimmässä olleista hiilen nieluista olisi saatu tunnistetuksi.

Metsän kasvun sitomaa hiiltä ei kuitenkaan varastoidu pelkästään metsäekosysteemiin, vaan laajemminkin koko metsäsektoriin eli myös puusta valmistettuihin tuotteisiin. Kauppi ym. (1992) ovat laskeneet, että Euroo-

passa varastoituu rakennuksiin ja muihin rakenteisiin vuosittain noin 80 miljoonaa kuutiometriä puuta sahatavarana ja rakennuslevyinä. Tämä vastaa noin 15 miljoonaa tonnia hiiltä eli runsasta yhtä prosenttia hiilitaseen tuntemattomista nieluista. Euroopassa käytetään kuitenkin vain viidennes maapallolla tuotetusta sahatavarasta ja puupohjaisista rakennuslevyistä, joten koko maailmassa puutuotteisiin voi varastoitua vuosittain jopa 70–80 miljoonaa tonnia orgaanista hiiltä.

Kun lisäksi käyttö on jatkuvasti kasvanut myös muilla teollistuneilla ja teollistuvilla alueilla, rakennuksiin ja muihin puisiin rakenteisiin saattaa sitoutua maapallolla vuosittain hiiltä määrä, joka vastaisi jopa viittä prosenttia aiemmin tuntemattomista hiilen nieluista.

Oletettua suurempi määrä puukuitutuotteita on ilmeisesti kulkeutunut uuden tyyppisiin hiilen varastoihin. Kaatopaikkojen jätteestä jopa lähes puolet on jätepaperia ja -kartonkia. Vaikka paperi yleensä kuvitellaan hyvin lyhytikäiseksi tuotteeksi, se kaatopaikkojen hapettomassa tai vähähappisessa tilassa saattaa hajota hyvinkin hitaasti. Paperia myös arkistoidaan ja säilytetään mm. kirjastoissa pitkiäkin aikoja. Vaikka paperin kierrätys vähentää kaatopaikoille sitoutuvan hiilen määrää, niin itse kierrätys pidentää paperin elinkaarta ja lisää hiilen sitoutumista.

Paperin ja sen käytön vaikutusta hiilen kiertokulussa ei juuri tunneta. Paperin ja muiden metsätuotteiden käytön lisääntymisen huomioon ottaminen saattaa pudottaa hiilitaseen toistaiseksi tuntemattomista syistä jäljellä olevan vajeen jopa puoleen edellä esitetystä noin 400 miljoonasta tonnista. Nyt esiteltävä tutkimus pyrkii osaltaan edesauttamaan näiden määrältään tuntemattomien hiilen nielujen kartoittamista.

Karjalainen ym. (1991) ovat tutkineet hiilen sitoutumista ja ilmasto-
muutoksen vaikutusta metsäekosysteemiin ja metsänkäyttöön Suomessa. Tutkimuksen mukaan metsäekosysteemiin sitoutuvan hiilen määrä riippuu puuston kehitysvaiheesta: nuorissa metsissä hiiltä sitoutuu enemmän kuin hengityksessä ja hajoamisessa vapautuu. Metsän vanhetessa hiilen sitoutuminen ja vapautuminen lähestyvät toisiaan. Vanhoissa metsissä (kliimaksivaihe) hiiltä sitoutuu ja vapautuu yhtä paljon.

Karjalainen ja Kellomäki (1992) ovat selvittäneet Suomen metsäekosysteemiin sitoutuneen hiilen määrää ja laskeneet hiilen sitoutumista metsiin erilaisilla metsien kasvuennusteilla. Tutkimuksen mukaan maamme metsien puusto voisi sitoa jopa kaksinkertaisesti nykyisen määrän hiiltä biomassansa. Tämä edellyttää kuitenkin metsäpinta-alan lisäämistä ja puuston tilavuuden kasvattamista. Metsien olisi myös sopeuduttava ilmansaasteisiin ja ilmaston mahdolliseen lämpenemiseen.

Norjalaiset ovat eturintamassa metsien hiilitasetutkimuksissa. Aalstad (1990a ja 1990b) selvitti Norjan metsien kasvua, puun loppukäyttökohteita ja tuotteiden elinkaaria sekä puustoon ja puunjalosteisiin sitoutuneen hiilen vaiheita. Tutkimuksen mukaan metsien puuston tilavuutta tulee kasvattaa samoin kuin puutuotteiden ja -jalosteiden elinkaaria pidentää, mikäli ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden lisääntymistä halutaan rajoittaa ja kasvihuoneilmiötä vaimentaa.

Hoen ja Solberg (1991) tutkivat metsätalouden merkitystä ilmakehän kasvihuonekaasujen (lähinnä hiilidioksidin) sitojana verrattuna muihin talouden sektoreihin sekä edelleen metsänkäyttelyvaihtoehtoja, joilla met-

sien hiilidioksidin sitomiskykyä voidaan tehokkaimmin kasvattaa. Tutkimus tehtiin case-tutkimuksena Buskerudin maakunnassa (574 000 hehtaaria metsää) Norjassa.

Solberg ym. (1992) tutkivat metsien merkitystä ilmakehän hiilidioksidin sitomisessa sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsäekosysteemiin ja metsien hiilensitomiskykyyn. Keinoiksi, joilla metsien biomassaa ja siten hiilensitomiskykyä voidaan kasvattaa, todettiin kasvatusmetsien perkaus, oikeat puulajivalinnat, metsäpinta-alan kasvattaminen, metsien lannoitus, puuston pidennetty kiertoaika, tiheämmät istutukset sekä soiden ojitus ja lannoitus.

Amerikkalaiset Row ja Phelps (1990) ovat kehittäneet mallin, joka simuloi puuhun sitoutuvia ja puun käytön vapauttavia hiilidioksidivirtoja hakkuista lopputuotteiden hajoamiseen ja hiilen haihtumiseen takaisin ilmakehään 100 vuoden ajanjaksolla. Tällä Harvcarb-mallilla voidaan simuloida mm. erilaisia metsänkäsittelyjä ja tehdä vertailuja niiden vaikutuksista hiilidioksidin kiertoon. Rowin ja Phelps (1990) mukaan yhä suurempi hakkuukertymä ja puun jalostaminen eri tuotteiksi sitovat hiiltä pidemmäksi aikaa kuin se, että suuret määrät täysin käyttökelpoista puuta jätettäisiin metsään. Näin siksi, että metsien runsas puusto on altis erilaisille tuhoille (esim. metsäpalo ja lahoaminen), joiden seurauksena puustoon sitoutunut hiili vapautuisi nopeasti takaisin ilmakehään. Puunjalosteisiin ja -tuotteisiin sitoutunut hiili on Rowin ja Phelps (1990) mukaan kauemmin poissa ilmakehästä kuin metsissä biomassaan sitoutunut ja sinne jätetty hiili.

Englantilaiset (Adger ym. 1991) tutkivat eri maankäyttömuotojen — lähinnä maatalouden ja metsätalouden — vaikutusta hiilitaseeseen Iso-Britanniassa. Metsien ja metsätaloustuotteiden todettiin sitovan huomattavan määrän ilmakehän hiiltä. Hiilen sitoutuminen riippuu kuitenkin metsien ikärakenteesta ja kehitysvaiheesta.

1.2 Tutkimustehtävä

Maapallon hiilitaseeseen puuttuvia nieluja on viime vuosina löydetty runsaasti. Metsän merkitys hiilitaseapainon löytymisessä on osoittautumassa merkittäväksi. Metsäekosysteemin hiilen kierto tunnetaan yhä paremmin ja yksityiskohtaisemmin. Sen sijaan puutteellisemmin tunnetuista hiilen nieluista ja hiilidioksidin lähteistä, joihin myös puun käytön sitoma ja puusta vapautuva hiili kuuluvat, on edelleenkin varsin niukasti tietoa.

Tämän tutkimushankkeen tehtävänä on laatia puunkäytön hiilitilinpito ja rakentaa siihen perustuva laskentamalli, jonka avulla hiilen sitoutumista puun käyttöön voidaan jäljittää ja analysoida. Tutkimuksen nyt raportoitava vaihe kohdistuu Suomen metsäsektoriin. Vaikka Suomen rooli on merkittävä metsäteollisuustuotteiden maailmankaupassa, metsätuotteiden käyttöön Suomen rajojen sisällä sitoutuu maailmanlaajuisesti vähän hiiltä.

Puunkäytön tilastointi on Suomessa pitkälle kehitetty ja antaa hyvät edellytykset puun käyttöön liittyvien laskenta- ja analyysijärjestelmien laatimiseen. Mahdollisuus laskentajärjestelmien empiiriseen testaamiseen

on tärkeää. Se motivoi sekä mallien rakentajia että niiden käyttäjiä. Tässä tutkimushankkeessa rakennettavan mallin rakenne ja laskentajärjestelmä voidaan myös sovittaa laajempaan ympäristöön, esimerkiksi Pohjoismaiden tai koko Euroopan tasolle.

Hiilen sitoutumista puuvarojen käyttöön jäljittelevän laskentajärjestelmän peruskehikko johdetaan puuainestilinpidoista, joka on luonnonvarain-tilinpidon osa. Luonnonvaraintilinpito puolestaan on kansantalouden tilinpidon laajennus. Sen avulla voidaan parantaa taloudellista suunnittelua liittämällä eritasoisiin suunnittelu- ja päätöksentekoprosesseihin luonnonvarojen käytön taloudellisia ja sosiaalisia ulottuvuuksia. Puuainestilinpito on Suomessa luonnonvarain-tilinpidon kehittämisen painopistealue (Luonnonvaraintilinpito 1992).

Tutkimuksen nyt raportoitava osuus toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensin muutettiin puuainestilinpito puunkäytön hiilitilinpidoksi. Tämä merkitsi yksinkertaisesti, että puu muutettiin muuntokertoimien avulla hiilimääräksi. Toisessa vaiheessa tutkittiin, kuinka pitkäksi aikaa hiili sitoutuu erilaisiin puunkäyttötapoihin. Kuinka kauan jokin puusta valmistettu tuote on luonnon kiertokulussa ja mitä sille tapahtuu tämän kiertokulun eri vaiheissa? Vastauksen kysymykseen antaa elinkaarianalyysi. Sen jälkeen yhdistettiin nämä tarkastelut ja pyrittiin analysoimaan, miten käyttöpuuhun sitoutunut hiili palautuu ajan myötä takaisin ilmakehään. Laskelmat kohdistuivat ajanjaksoon 1990–2040.

2 Metsät, puun käyttö ja hiilitasapaino

2.1 Metsäsektori ja hiilen kiertokulku

Hiilen kierto maan kuoressa, merissä, ilmakehässä ja biosfäärissä jakautuu kahteen osaan. Ns. pitkä kierto kuvaa vuosimiljoonien aikana ilmaston ominaisuuksia säätelevää geokemiallista hiilenkiertoa. Kallioperä on keskeinen tekijä tässä kierrossa. Maapallon ns. lyhyeen hiilen kiertoon osallistuu ilmakehän, merien ja biosfäärin hiili. Valtaosa tästä hiilimäärästä on varastoitunut valtameriin. Hiilidioksidi ei häviä ilmakehästä kemiallisten reaktioiden kautta, mutta se on mukana kahdessa luonnonkierrossa: fotosynteesikierrossa ja valtamerikielrossa. Kummankin kierron vuosivolyymi on noin 100 Gt (Gigatonnia, 10^9 tonnia). Ne eivät kuitenkaan ole keskenään täsmälleen yhtä suuret, mikä johtaa ilmaan kertyvän hiilidioksidin lisääntymiseen.

Maaperän ekosysteemit hallitsevat maapallon lyhyttä hiilenkiertoa. Maaperä ja kasvillisuus sitovat noin kolme kertaa niin paljon hiiltä kuin ilmakehä. Ne myös vaihtavat 20 kertaa niin paljon hiiltä kuin fossiilisten polttoaineiden käytöstä vapautuu ilmakehään. Siksi yksi ehdotettu keino hidastaa ilmakehän hiilidioksidin lisääntymistä on ohjata maaperän ekosysteemejä varastoimaan hiiltä ilmakehästä. Tämä tapahtuisi muuttamalla yhteyttämisen avulla sitoutuneen ja lahoamisen sekä biomassan polttamisen kautta vapautuvan hiilidioksidin välistä tasapainoa. Viime aikoina on alettu korostaa metsien biomassan lisäämistä keinona sitoa ilmakehän hiilidioksidia (Kauppi ja Tomppo 1993, Karjalainen ja Kellomäki 1991, Schroeder ja Ladd 1991, Sedjo ja Solomon 1989, Turner ym. 1993).

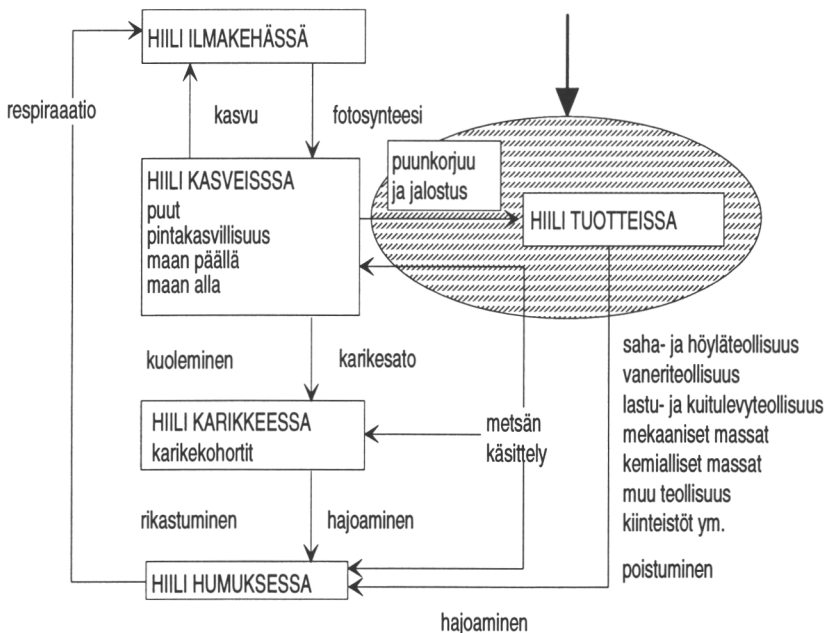
Metsät hallitsevatkin biosfäärin hiilenkiertoa. Maapallon ekosysteemin maanpäällisiin osiin sitoutuneesta 562 Gt:sta hiiltä 86 % eli 483 Gt arvioidaan olevan metsissä (Sedjo 1992). Maaperään sitoutuneesta 1272 Gt:sta hiiltä 73 % eli 927 Gt on metsien maaperään sitoutuneena. Yhteensä metsissä on siis kolme neljäsosaa koko ekosysteemiin sitoutuneesta hiilestä. Laskelmat eivät kuitenkaan toistaiseksi ole kovin täsmällisiä ja esitetyt arviot vaihtelevatkin kohtalaisen paljon (vrt. esim. Karjalainen ym. 1991). Ei ole olemassa minkäänlaista tietoa siitä, kuinka paljon puusta valmistettuihin tuotteisiin on maapallolla hiiltä varastoituneena. Puustoon sitoutuneeseen hiileen verrattuna määrä lienee kuitenkin vähäinen.

Kuvassa 1 on esitetty hiilen kiertokulku ilmakehästä metsien biomassaan ja edelleen puunkorjuun ja jalostuksen kautta metsäteollisuustuotteisiin sekä lopulta näiden hajoamisen kautta takaisin ilmakehään. Puunkäy-

tön hiilitilinpito kuvaa puiden yhteyttämisen avulla sitoman hiilen kiertoa puusta korjuun ja kuljetuksen kautta puunjalostukseen sekä edelleen tuotteiden käyttöön, ja lopulta hajoamisen kautta hiilen vapautumiseen hiilidioksidina takaisin ilmakehään.

Metsän roolin kasvihuonekaasuja säätelevänä tekijänä tekee tärkeäksi erityisesti kolme seikkaa (Hoen ja Solberg 1991). Ensiksi, puuhun ja koko metsäekosysteemin biomassaan sitoutuu orgaanisena hiilenä yhteyttämisen prosessissa suuret määrät ilmakehän hiilidioksidia, joka on varastoituneena tässä systeemissä yleensä hyvin pitkään; meidän oloissamme joskus jopa satoja vuosia. Hiilen varastoituminen jatkuu edelleen puusta valmistetuissa tuotteissa, joiden elinikä sekin saattaa pisimmillään esimerkiksi hirsirakenteissa olla satoja vuosia.

Toiseksi, lisääntyvät hiilen varastot metsissä sallivat joustavuutta tilanteessa, jossa ilmastonmuutoksesta ja sen seurausvaikutuksista ei tarkoin tiedetä. Tämä metsien lisääntyvän biomassan mukanaan tuomien joustomahdollisuuksien lisääntyminen on hyvin mielenkiintoinen ilmiö. Jos nimittäin ihmisen toiminnallaan aiheuttama ilmastonmuutos osoittautuu todelliseksi, orgaanisen hiilen lisääntyneillä varastoilla — esimerkiksi puuna ja metsäteollisuustuotteina — on positiivinen arvo, sillä ne pienentävät ilmakehän hiilidioksidin määrää. Mikäli ilmastonmuutos ei kuitenkaan osoittaudu vakavaksi ongelmaksi, lisääntyneellä puustolla on siinä-



Kuva 1. Hiilen kiertokulku ilmakehästä biomassaan ja tuotteisiin ja takaisin ilmakehään (Mukaiito Karjalaisen ja Kellomäen (1991) julkaisusta).

Tumma soikio kuvaa puun käyttöä, johon tämä tutkimus keskittyy. Puun käytön osuus koko metsäsektorin hiilenkierrossa on vähäinen. Sen merkitys kuitenkin korostuu Suomessa varsinkin silloin, jos ja kun ilmastopimuksista aletaan toden teolla neuvotella.

kin tapauksessa hyvin todennäköisesti positiivinen arvo puuraaka-aineena. Tämä lisää joustavuutta hyödyntää tulevaisuudessa niitä mahdollisuuksia, joita nykyisillä metsienkäsittelypäätöksillä saadaan aikaan.

Kolmanneksi, puuntuotannon ja metsien käsittelyn teknologia on useimmissa teollistuneissa maissa hyvin kehittyynyttä ja sitä on suhteellisen helppo hallita pitkälle kehitetyn lainsäädännön vuoksi. Näin ollen puuntuotannolla ja metsien käsittelyllä voidaan suhteellisen helposti ja hallitusti ilman erityisen suuria riskejä vaikuttaa hiilenkiertoon.

Metsän rooli ilmakehän hiilidioksidin sitojana valottaa metsän taloudellista merkitystä uudesta, perinnäiseen puuntuotantoon verrattuna erilaisesta näkökulmasta. Perinnäisessä puuntuotannossa hyöty saadaan, kun puu kaadetaan ja korjataan metsästä sekä jalostetaan tuotteiksi. Jos taas metsän kasvulla aikaansaatu ilmakehän hiilidioksidin väheneminen on ilmastonmuutoksen kannalta eduksi, hyötyä saadaan jo puun kasvaessa.

Puuntuotanto vaikuttaa ilmakehän hiilidioksiditaseeseen kahden prosessin kautta: hiilen sitoutumisen ja vapautumisen välityksellä. Edellinen liittyy puiden kasvuun yhteyttämisen kautta ja jälkimmäinen puun mätänemiseen luonnollisen kuoleamisen tai puun hakkuun ja tuotteiden loppukäytön välityksellä. Puuntuotannon hiilidioksidin sitoutumis- ja vapautumisprosessien välillä on yleensä pitkä aikaviive. Kun ilmakehän hiilidioksidi sitoutuu puuhun, sen aiheuttama hyöty saadaan ennen perinnäisen puuntuotannon aikaansaamia hyötyjä. Tuotteiden lahoamisen aiheuttamasta hiilidioksidin vapautumisesta aiheutuva haitta (kustannus) puolestaan syntyy lähes poikkeuksetta vasta perinnäisestä puuntuotannosta tulevien hyötyjen jälkeen. Perinnäisen puuntuotannon ja hiilen sitoutumisen ja vapautumisen yhtäaikainen tarkastelu tuo eri toten kustannusten ja hyötyjen tarkastelun uuteen valoon. Tämän huomioon ottaminen saattaisi vaikuttaa metsienkäsittelypäätöksiin. Oman näkökulmansa tarkasteluun tuovat luonnollisesti metsän tuottamat virkistys-, suoja- ja muut monikäyttöarvot. Niitä ei kuitenkaan tarkastella tässä raportissa.

2.2 Metsäsektori ja kasvihuoneilmiö

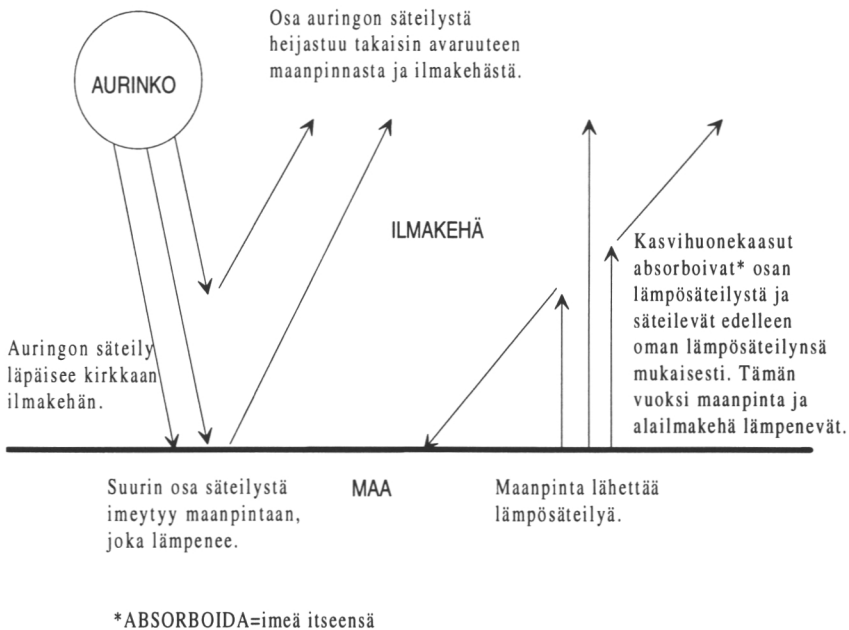
Kasvihuonekaasujen rajoittamisessa yhtenä strategiana monien joukossa on korostettu metsien biomassan lisääntyvän tuotannon merkitystä ilmakehän hiilidioksidin sitojana. Mikäli kansainvälisten ilmasopimusten mukaisesti aletaan laatia kansallisia ja alueellisia strategioita kasvihuoneilmiön voimistumisen torjumiseksi, tulee strategioiden laadinnan taustalla olevaa tietoa lisätä ja täsmentää. Metsään liittyvä tieto puun koko elinkaaren ajalta yhteyttämisestä hajoamisprosessiin on Suomen kannalta ensi sijaisen tärkeää.

Maapallon metsistä noin 42 prosenttia sijaitsee teollisuusmaissa pohjoisella pallonpuoliskolla ja 58 prosenttia metsistä on pääasiassa kehitysmaiden trooppista metsää. Trooppisten metsien on arveltu vähenevän vuosittain noin 15 miljoonaa hehtaaria (Singh 1993). Tästä ilmakehään vapautuvan hiilen määrä on noin 40 prosenttia fossiilisten polttoaineiden käytön vuosittain vapauttamasta hiilen määrästä (vrt. Karjalainen ym. 1991).

Sedjon (1990) arvion mukaan 500 miljoonan hehtaarin istutukset tropiikissa sitoisivat pitkällä aikavälillä mahdollisesti kaiken hiilen, noin 5 Gt, joka vuosittain vapautuu fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Vaadittava istutusala olisi kuitenkin valtava, noin 25-kertainen verrattuna esimerkiksi Suomen metsien kokonaispinta-alaan.

Ilmakehään kuuluu luontaisesti varsinaisten kasvihuonekaasujen kaltaisia yhdisteitä, jotka läpäisevät auringosta tulevaa lyhytaaltoista säteilyä, mutta pidättävät maapallon lähettämää pitkäaaltoista säteilyä pitäen maapallon ilmakehän lämpimänä (Kuva 2). Kasvihuoneilmiö on näin ollen elämälle välttämätön. Ilman kasvihuonekaasuja ilmakehän keskilämpötila olisi -18°C , kun se nyt on noin 15°C .

Kasvihuoneilmiön aiheuttamasta ilmaston lämpötilanmuutoksesta on esitetty hiukan toisistaan poikkeavia arviota. Kulmala (1992) esittää IPPC:n arvion mukaan (International... 1991) maamme keskilämpötilan nousevan talvella Etelä-Suomessa 3°C ja Pohjois-Suomessa 5°C sekä kesällä koko maan alueella noin 3°C . Hiilidioksiditoimikunta (Komiteanmietintö 1991:21) arvioi lämpötilan nousun olevan korkeampi, jopa $6-9^{\circ}\text{C}$ talvikaudella.



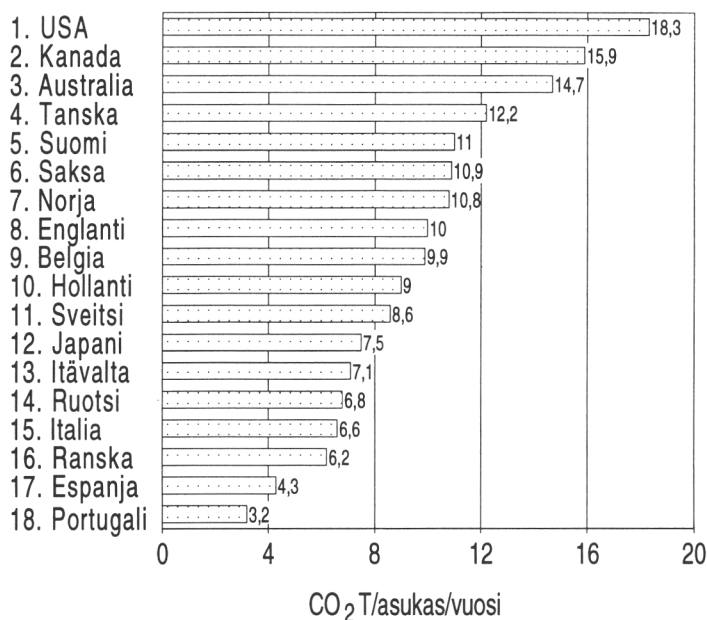
Kuva 2. Kasvihuoneilmiö pähkinänkuoressa (Ilmastomuutos... 1992).

Kasvihuoneilmiöllä tarkoitetaan pelkistetysti seuraavaa prosessia: Auringon lyhytaaltoinen säteily läpäisee ilmakehän lähes esteittä. Maanpinnan pitkäaaltoinen lämpösäteily imeytyy osittain ilmakehään, jossa useat kasvihuonekaasut (mm. vesihöyry, hiilidioksidi, metaani, typpioksiduuli, otsoni) lähettävät lämpösäteilyä edelleen oman lämpötilansa mukaisesti. Koska avaruuteen karkaava lämpösäteily on keskimäärin tasapainossa imeytyneen auringon säteilyn kanssa, ovat sekä ilmakehä että maanpinta lämpimämpiä kuin ilman kasvihuonekaasuja.

Lämpötilan muutokset aiheuttaisivat muutoksia maamme sateisuuteen ja maaperän kosteusoloihin. Viljelykasvien ja pohjoisten havumetsien kasvuolosuhteet muuttuisivat olennaisesti. Maataloudelle keskilämpötilojen muutokset olisivat edullisia, kun taas havumetsien kannalta tilanne olisi päinvastainen. Havumetsiä uhkaisi lämpötilan nousun ja ilmansaasteiden yhteisvaikutus. Metsien tuhohyönteiset ja -sienet saattaisivat hyötyä muuttuvista olosuhteista. Maahamme voisi levitä uusia tuholaisia, havumetsien talvilepokausi lyhenisi ja lehtipuumetsät valtaisivat havumetsien kasvu- paikkoja. Metsät olisivat vaarassa ränsistyä. Metsien kannalta oleellista on kasvihuoneilmion nopeus. Eräiden arvioiden mukaan boreaaliset metsät saattaisivat jopa kokonaan tuhoutua ennen sopeutumista muuttuneisiin olosuhteisiin (Komiteanmietintö 1991:21).

2.3 Suomi, metsäsektori ja hiilitasapaino

Suomen hiilidioksidipäästöt ovat maailmanlaajuisesti vähäiset. Hiilidioksidin ominaispäästöt eli päästöt henkeä kohden ovat meillä kuitenkin suu-



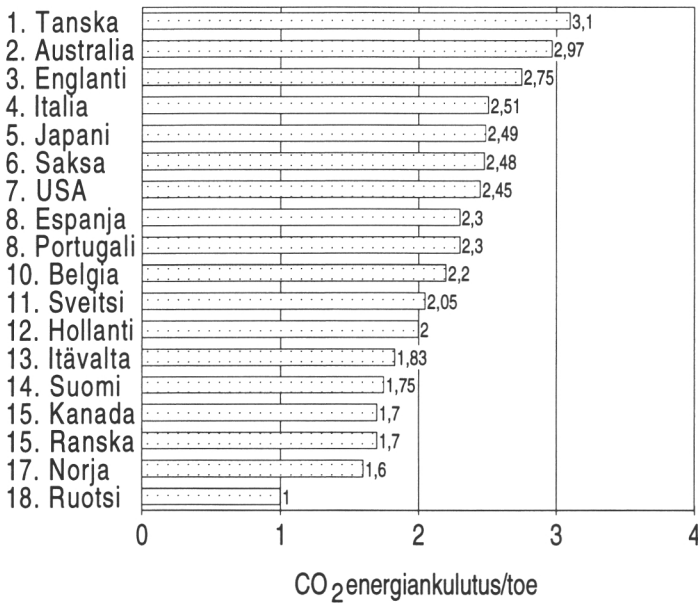
Kuva 3. Hiilidioksidin ominaispäästöt eräissä OECD -maissa vuonna 1987, tonnia/asukas/vuosi (Manninen ja Marttila 1991).

Kuvaan ei ole laskettu kaikkien uusiutuvien luonnonvarojen — kuten esimerkiksi puun — polton aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Jos nämä laskettaisiin mukaan, kuvan maittainen järjestys muuttuisi. Esimerkiksi Suomi nousisi ainakin Tanskan yläpuolelle ja erityisesti Ruotsin hiilidioksidipäästöt kohoaisivat voimakkaasti. Kaikki hiilidioksidipäästöt mukaan lukien ominaispäästöt Suomessa olisivat olleet lähes 14 tonnia/asukas/vuosi ja Ruotsissa noin 9,5 tonnia/asukas/vuosi vuonna 1987.

ret. Suomessa ominaispäästö on noin 11 miljoonaa hiilidioksiditonna eli 2,9 tonnia hiiltä/asukas/vuosi (kuva 3), kun maapallon keskiarvo on noin 1,2 tonnia hiiltä/asukas/vuosi (Kulmala 1992). Niinpä Suomen osuus hiilidioksidipäästöistä on lähes 0,3 prosenttia, vaikka osuutemme maapallon väestöstä on vain 0,1 prosenttia.

Suomen energiavaltaisuus ja siitä johtuvat korkeat hiilidioksidin ominaispäästöt johtuvat lähinnä kolmesta rakenteellisesta seikasta (Manninen ja Marttila 1991). Ensiksikin, kylmä ilmasto vaatii rakennusten kohtuullisen hyvää eristyksestä huolimatta paljon lämmittämistä pitkänä talvikautena. Toiseksi, harva asutus edellyttää runsaasti henkilö- ja tavarakuljetuksia. Kuljetusten osuus Suomen kansantuotteesta on peräti viidennes. Kolmanneksi, teollisuutemme on energiaintensiivistä erityisesti vientisektorilla, metsä- ja metalliteollisuudessa.

Näistä seikoista huolimatta Suomen energiasektorin hiilidioksidipäästöt tuotettua energiayksikköä kohden ovat pienemmät kuin useimmissa OECD-maissa (Kuva 4). Tämä johtuu vesi- ja ydinvoiman suuresta osuudesta sähköntuotannossa, kaukolämmityksen ja teollisuuden tuotantoon



Kuva 4. Hiilidioksidin ominaispäästöt eräissä OECD -maissa vuonna 1987, tonnia hiilidioksidia/energiankulutus toe (ekvivalenttia öljytonnia) (Manninen ja Marttila 1991).

Vaikka hiilidioksidin ominaispäästöt henkeä kohti ovatkin Suomessa suuret, eivät ne käytetyn energian määrän suhteen ole kansainvälisesti kovinkaan korkeat. Laaja, kylmä ja harvaanasuttu maa yhdessä energiavaltaisen vientisektorin kanssa tekevät Suomesta energiavaltaisen kansantalouden, mutta toisaalta olosuhteet ovat opettaneet käyttämään energiaa suhteellisen tehokkaasti.

liittyvästä sähkön ja lämmön yhteistuotannosta sekä energiantuotannon tehokkuudesta (Manninen ja Marttila 1991).

Suomen hiilidioksidipäästöt olivat yleisesti käytetyn laskutavan mukaisesti vuonna 1988 noin 54 miljoonaa tonnia eli hiileksi muunnettuna lähes 15 miljoonaa tonnia. Hiilidioksidipäästöistä 98 prosenttia syntyi energiantuotannosta ja -käytöstä ja 2 prosenttia teollisuuden prosesseista (esimerkiksi sementin tuotanto). Taulukossa 1 ilmoitettujen päästöjen lisäksi hiilidioksidia vapautuu mm. soiden ja metsien ojitusten sekä biomassan hajoamisen seurauksena.

Taulukon 1. hiilidioksidipäästöissä eivät ole mukana myöskään puun ja metsäteollisuuden puuperäisten jätelienten poltosta syntyvät hiilidioksidipäästöt. Tämä on varsin yleisesti käytetty laskutapa, jota perustellaan sillä, että metsimme sitoutuu vuosittain puun energiakäyttöä vastaava määrä hiiltä (esim. Mattila 1991). Kokonaispäästöihin kuuluvat kuitenkin myös puujätteen, jätelienten ja polttopuun polton aiheuttamat hiilidioksidipäästöt eli lähes 18 miljoonaa tonnia. Näin laskien hiilidioksidin vuosittaiset kokonaispäästöt ovat noin 72 miljoonaa tonnia. Puun osuus hiilidioksidipäästöistä on näin laskien huomattava; se on neljännes vuosittaisista hiilidioksidin kokonaispäästöistä.

Taulukko 1. Hiilidioksidipäästöt Suomessa 1988 (Boström ym. 1990).

Hiili	13,1 milj.t (CO ₂)	(24 %)
Raskas polttoöljy	8,2 milj.t (CO ₂)	(15 %)
Kevyt polttoöljy	8,5 milj.t (CO ₂)	(16 %)
Dieselöljy	4,6 milj.t (CO ₂)	(9 %)
Moottoribensiini	5,7 milj.t (CO ₂)	(11 %)
Jalostamojen oma käyttö	1,4 milj.t (CO ₂)	(3 %)
Maakaasu	3,2 milj.t (CO ₂)	(6 %)
Turve	4,5 milj.t (CO ₂)	(8 %)
Muut (masuuni ja koksamokaasut, tms)	4,1 milj.t (CO ₂)	(8 %)
Sementin tuotanto, noin	1,0 milj.t (CO ₂)	(2 %)
Yhteensä, noin	54,0 milj.t (CO₂)	(100 %)

(Puun energiakäyttö eri muodoissaan, noin 18,0 milj. tonnia)

3 Hiilen sitoutuminen puuvarojen käyttöön Suomessa

3.1 Puuainestilinpidon yhteys puun käytön hiilitilinpitoon

Puuainestilinpidossa seurataan puun kulkua ja metsien puuvarojen muutoksia sekä puun käyttöä metsäteollisuudessa ja muilla kansantalouden toimialoilla kansantalouden tilinpidon kehikossa (Luonnonvaraintilinpito 1992). Puuainestilinpito jakaantuu kolmeen eri laskelmaan: puutaseeseen, käyttötiliin ja massatiliin.

Puutaseessa seurataan puuvarannossa vuosittain tapahtuvia muutoksia kasvun, luonnollisen poistuman ja hakkuiden seurauksena. Kasvua ja kokonaispoistumaa seurataan puulajeittain ja hakkuita puutavaralajeittain. Puutase perustuu 7. ja 8. valtakunnan metsien inventoinnin sekä puunkäyttö- ja poistumatutkimusten tietoihin. Tilastokeskuksen laatimassa puuainestilinpidossa (Luonnonvaraintilinpito 1992) käytetään puutaseesta nimeä metsätase. Puutase lienee kuitenkin kuvaavampi termi, koska metsässä on muutakin kuin puuta.

Käyttötilissä seurataan hakkuissa korjatun raakapuun muuntoa ja käyttöä välituotteina, lopputuotteina ja jätteenä. Yksikköinä käytetään kuorellista kiintokuutiometriä ja tuotetonnia. Puuainestilinpidossa käytetään käyttötilistä nimeä käyttötase. Koska kuitenkin tarkastellaan virtasuureita eikä varantoja, lienee käyttötili kuvaavampi termi.

Käyttötili sisältää 10 kansantalouden tilinpidon mukaista metsäteollisuuden toimialaa, 40 muuta teollisuus- ja loppukäyttötoimialaa ja noin 220 raaka-aine-, välituote-, hyödyke- ja jätenimikettä. Metsäteollisuuden toimialoja ovat sahaus ja höyläys, vanerin valmistus, lastulevyn valmistus, kuitulevyn valmistus, mekaanisen massan valmistus, kemiallisen massan valmistus sekä paperin ja kartongin valmistus. Puun käytön kannalta tärkeitä toimialoja ovat puutaloteollisuus, rakennusmateriaalien valmistus, huonekalujen ja kalusteiden valmistus, paperituotteiden ja -pakkausten valmistus, painaminen ja kustannustoiminta ja myös muu teollisuus osittain (esim. kemiallisten, öljy-, kumi- ja muovituotteiden valmistus, savi-, lasi- ja kivituuotteiden valmistus, metallien valmistus). Lopputuotesektoreita ovat maatalous ja puutarhanviljely, sähkö- ja lämpöhuolto, rakennustoiminta, kauppa ja liikenne sekä julkinen sektori.

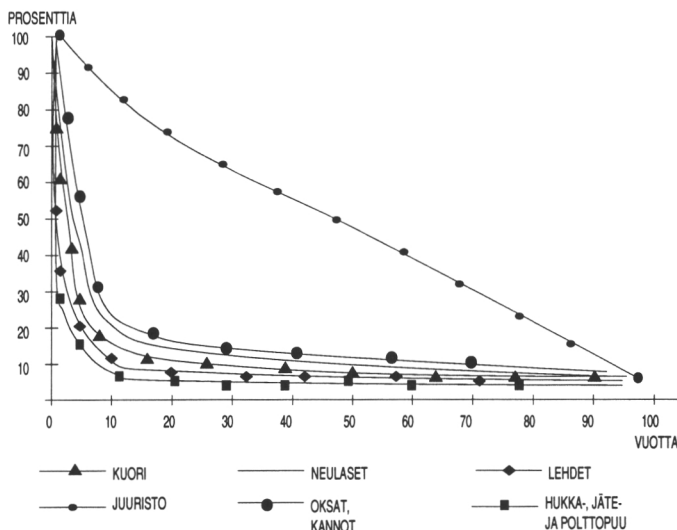
Massatilissä metsäteollisuuden toimialojen raaka-aineet ja tuotteet muunnetaan puun kuiva-ainetonneiksi. Massatili kertoo, mikä määrä puuainesta on vuosittain sitoutunut metsäteollisuuden raakapuuhun, välituotteisiin, valmisteisiin ja puuainespitoiseen jätteeseen. Puuainestilinpidossa käytetään massatilin asemesta termiä massatase. Koska tässäkin tarkastellaan virtasuureita, lienee massatili kuvaavampi termi.

Puunkäytön hiilitilinpidoissa lasketaan metsistä hakkuiden kautta poistuvan puuston sisältämä hiili, hiilen sitoutuminen eri puunkäyttösektoreiden tuotteisiin ja hiilen vapautuminen takaisin ilmakehään lopputuotteiden elinkaarien päätyttyä. Laskelmat perustuvat puuainestilinpitoon ja kohdistetaan vuoteen 1990.

Hiilitilinpidoissa käytetään kaikkia puuainestilinpidon kolmea laskelmaa. Metsätaseen (puutase) ja käyttötaseen (käyttötase) puumäärille ja tuotteille lasketaan niiden sisältämän puuaineen kuiva-ainepitoisuus. Kuiva-ainepitoisuuksista lasketaan puustoon sekä puunjalosteisiin ja -tuotteisiin sitoutuneen hiilen määrä ja hiilen kulku eri toimialoille. Puunjalosteille ja -tuotteille määritellään elinkaaret, joiden avulla lasketaan hiilen sitoutuminen ja lopulta vapautuminen takaisin ilmakehään. Sekä Tilastokeskuksen laatima Suomen puuainestilinpito (Luonnonvaraintilinpito 1992) että nyt esiteltävä puunkäytön hiilitilinpito ovat tietävästi laatuaan ensimmäisiä maailmassa. Mikäli tarve tulee vaatimaan, laaditaan myös puun käytön hiilitilinpidoista aikasarjat, esimerkiksi puuainestilinpidon tapaan vuodesta 1980 lähtien.

3.2 Elinkaarianalyysi

Elinkaarianalyysi kuvaa sitä aikaa, jonka puustoon sitoutunut hiili on pois ilmakehästä puun käytön kautta metsäteollisuustuotteisiin tai muihin puutuotteisiin sitoutuneena. Edelleen se analysoi aikaa, joka kuluu tuotteiden



Kuva 5. Hakuutähteiden ym. puuston biomassan elinkaaret ja hajoaminen metsässä taulukon 2 sekä yhtälöiden [1] ja [2] mukaan.

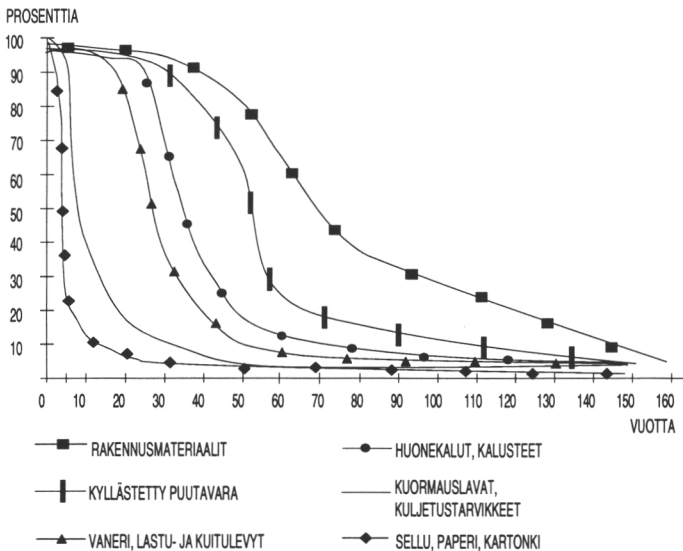
Juuristo varastoi yhteytämisen välityksellä metsäekosysteemiin sitoutuvaa orgaanista hiiltä pitkäksi ajaksi, jopa yli sadaksi vuodeksi. Sen sijaan muut puun osat — oksat, kannot, kuori, lehdet ja neulaset — luovuttavat sitomansa hiilen takaisin ilmakehään jo 5–15 vuoden kuluessa metsän hakkuidista.

den käytössä ja hajoamisessa kunnes hiili on palautunut takaisin ilmakehään. Elinkaarianalyysi osoittaa siis, minkä ajan ja millä tavalla tietynä hetkenä metsäteollisuustuotteisiin sitoutunut hiili on pois ilmakehästä lisäämästä ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta.

Metsäteollisuustuotteista on vain harvoja hiilen sitoutumisen näkökulmasta tehtyjä elinkaaritutkimuksia, mm. Yhdysvalloissa (US. Dept... 1942), Iso-Britanniassa (Matthews & Thompson 1989) ja Norjassa (Aalstad 1990a ja 1990b). Näiden avulla Suomen oloihin soveltaen määritettiin puutuotteille ja -jalosteille elinkaaret ja hiilen vapautuminen takaisin ilmakehään. Tulokset on esitetty taulukossa 2 sekä kuvissa 5 ja 6.

Antropogeeninen elinikä tarkoittaa aikaa, jonka tuote on käytössä ja jonka aikana lahoamista, hajoamista tai hiilen emissiota eli vapautumista takaisin ilmakehään ei tapahdu. Lahoamisaika alkaa antropogeenisen ajan loputtua ja se katsotaan päättyneeksi, kun 90 prosenttia tuotteen biomassasta on hajonnut ja 90 prosenttia hiilestä on vapautunut takaisin ilmakehään. Jäljelle jäävä 10 prosenttia johtuu siitä, että osa tuotteista ei koskaan hajoa tai hajoaa hyvin hitaasti (esimerkkinä mumioid, fossiilit, museoissa olevat muinaisjännökset ja -löydöt). Lahoamisaste määritettiin viisivuotiskausittain prosentiosuuksina tuotteen alkuperäisestä hiilimäärästä. Lahoamisen matemaattinen kaava on seuraava (vrt. Hoen & Solberg 1992):

$$q_i = 1 - | 0.1^{1/n} | \quad [1]$$



Kuva 6. Puutuotteiden ja -jalosteiden elinkaaret ja hajoaminen.

Tuotteiden käytön ja hajoamisen perusteella lasketut elinkaaret ovat yleensä suhteellisen pitkiä, 50:stä jopa yli 150:een vuoteen. Kun tuotannon painopiste Suomessa on kuitenkin keskittynyt massan ja paperin valmistukseen, jossa elinkaaren pituus on yleensä alle viisi vuotta, vapautuu metsäteollisuustuotteisiin varastoitunut orgaaninen hiili suhteellisen nopeasti takaisin ilmakehään.

Taulukko 2. Puutuotteiden ja -jalosteiden elinkaaret ja lahoamisasteet (Aalstad 1990a ja 1990b).

	Käyttöikä eli antropogeeninen ikä, v.	Lahoamis-aika, v.	Lahoamisaste, % ensimmäisellä viisivuotiskaudella
Kuori: jäte	0	8	76,3
Kuori: poltto	0	1	99,9
Neulaset	0	11	64,9
Lehdet	0	7	80,7
Oksat, kannot	0	12	61,7
Juuristo	0	100	10,9
Polttopuu	0	1	99,9
Sahatavara	80	80	13,4
Rak.materiaalit	80	80	13,4
Vaneri	17	33	29,5
Lastu- ja kuitulevyt	17	33	29,5
Huonekalut, kalusteet	20	50	20,8
Kyllästetty puutavara	40	30	31,9
Kuormauslavat	2	23	39,4
Hukkapuu, jätepuu	0	1	99,9
Sahanpuru	1	2	99,7
Mekaaniset massat	1	2	99,7
Kemialliset massat	1	2	99,7
Paperi	1	2	99,7
Kartonki	1	2	99,7

jossa q_i on tuotteen i lahoamisaste ja n ilmaisee lahoamisajan (D_T) viiden vuoden pituisina periodeina. Yhtälöstä [1] seuraa, että lahoaminen tapahtuu eksponentiaalisesti ajan funktiona. Kunkin tuotteen päästöt aikajak-solla ($t+j$) lasketaan kaavasta:

$$E_{i,t+j} = B_{Rt} \times e_i \times Q \quad [2]$$

jossa t on hakkuuajankohta ja j hakkuista kulunut aika (viisivuotisjak-soina). $Q = (1-q_i)^m \times q_i$, jossa m ilmoittaa viisivuotiskausien määrän lahoamisen alkamisesta aikajaksoon j . $B_{Rt} \times e_i$ on lopputuotteeseen i tarkaste-lujakson alussa sitoutunut hiilimäärä.

Taulukko 2 sekä kuvat 5 ja 6 perustuvat Aalstadin (1990a ja 1990b) analyysiin hakkuutähteiden sekä puutuotteiden ja puunjalosteiden elini-ästä ja lahoamisasteesta. Aalstadin tuoteluokitus ei vastaa täysin kansan-talouden tilinpidon lopputuotesektorin tuoteluokitusta. Sen vuoksi elin-kaaria ja tuotejakautumaa on muutettu tässä tutkimuksessa Aalstadin (1990a ja 1990b) käyttämästä luokituksesta.

Kuvassa 5 ovat puuston muun kuin teollisuuden käyttöön menevän, hakkuissa metsistä poistuvan biomassan ja polttopuun elinkaaret ja hajoa-minen metsässä. Puuston biomassasta lyhin elinkaari on hukka-, jäte- ja polttopuulla. Pisin elinkaari, jopa yli 100 vuotta, on juuristolla.

Kuvassa 6 ovat puutuotteiden ja -jalosteiden elinkaaret ja hajoaminen. Lyhyin elinkaari, noin viisi vuotta, on sellulla, paperilla ja kartongilla. On kuitenkin muistettava, että osa paperi- ja kartonkituotteista säilyy mm.

Taulukko 3. Puutase ja sen hiilisisältö 1990.

	Milj. m ³	Kuiva-ainepitoisuus, milj. tonnia	Hiilisisältö, milj. tonnia
Varanto 1.1.1990	1896,3	788,0	406,6
Vuosikasvu	77,0	32,1	16,6
Kokonaispoistuma	55,0	22,9	11,8
Luonnonpoistuma	1,3	0,5	0,3
Bruttohakkuut1)	53,7	22,4	11,5
Metsäjättepuu	4,8	2,1	1,1
Nettohakkuut1)	48,9	20,3	10,5
Tukkipuu	21,2	8,5	4,5
Kuitupuu	24,4	10,2	5,2
Polttopuu	3,4	1,5	0,7
Varanto 31.12.1990	1918,4	797,2	411,3

1) Puunkäyttötilastossa bruttohakkuita vastaava käsite on hakkuupoistuma ja nettohakkuita vastaava käsite hakkuukertymä.

arkistoissa useita satoja vuosia. Pisimmät elinkaaret ovat rakennusmateriaaleilla, yli 150 vuotta.

Ilmeisesti puutuotteista vapautuu hiiltä jo antropogeenisen eliniän kuluessa toisin kuin taulukossa 2 on esitetty. Sahatavaraa ja levyjä joutuu kaatopaikoille tai lahoaa ulkoilmassa huonosti suojattuna sekä rakennusvirheiden vuoksi jo hyvinkin pian valmistuksen jälkeen. Sen vuoksi kuvan 6 elinkaarikäyrät poikkeavatkin jonkin verran antropogeenisen ikänsä aikana taulukon 2 luvuista. Luvun 3.4 hiilen kiertokulkuanalyysi on kuitenkin tehty taulukon 2 lukujen mukaisesti.

Toisaalta paperituotteiden hiilen vapautuminen on ilmeisesti hitaampaa kuin taulukon 2 luvut osoittavat, joten yliarviot puutuotteiden lahoamisasteesta antropogeenisen iän aikana korvautuvat aliarvioilla paperituotteiden lahoamisesta. Loppukäytön tilastointi ei mahdollistanut yksityiskohtaisempaa elinkaarianalyysiä tutkimuksen tässä vaiheessa.

3.3 Puunkäytön hiilitilinpito

3.3.1 Puutaseen hiilisisältö

Hiilitaseessa lasketaan ensin metsätaseen kunkin tase-erän sisältämän puun hiilimäärä. Hiilisisältö saadaan laskemalla puulajeittain puuston kuiva-ainepitoisuus. Kertoimet puuston kuiva-ainepitoisuuden laskemiseksi ovat Karjalaisen ja Kellomäen (1991) julkaisusta. Männyn kuiva-ainepitoisuus lasketaan kertoimella 409 kg/m³, kuusen 387 kg/m³ ja lehtipuun (lähinnä koivu) 488 kg kuiva-ainetta/m³ puuta. Hiilisisältö saadaan laskemalla hiilen määrä kuiva-ainekiloa kohti. Myös tähän ovat kertoimet Karjalaisen ja Kellomäen (1991) julkaisusta. Männyn ja kuusen kuiva-aineen hiilisisältö lasketaan kertoimella 0,519039 kg C/kg kuiva-ainetta ja lehtipuun kertoimella 0,504669 kg C/kg kuiva-ainetta.

Suomen metsien runkopuuvaramoon oli vuoden 1990 lopussa sitoutunut hiiltä noin 410 miljoonaa tonnia (Taulukko 3). Puuston kasvun seu-

Taulukko 4. Metsäekosysteemiin sitoutunut hiili 1990 (Karjalainen ja Kellomäki 1990).

	miljoonaa tonnia	%
Puusto		
– runkopuu	410	15
– oksat	120	4
– neulaset/lehdet	40	1
– juuret	170	6
Yhteensä	740	26
Pintakasvillisuus	30	1
Maaperä (0–30 cm)	2040	73
Kaikkiaan	2810	100

rauksena hiiltä sitoutui vuoden 1990 kuluessa lisää lähes 17 miljoonaa tonnia. Puuston kokonaispoistuman mukana hiiltä poistui lähes 12 miljoonaa tonnia, jolloin metsien runkopuustosta hiilen nettositominen oli vuonna 1990 noin 5 miljoonaa tonnia. Se vastaa runsasta neljännestä ihmisen toimillaan aikaansaamista hiilidioksidipäästöistä Suomessa. Puuainestilinpidon mukaisen metsätaseen hiilitilinpitolaskelma on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

Vertailun vuoksi esitetään myös koko metsäekosysteemiin sitoutuneen orgaanisen hiilen määrät (Taulukko 4). Karjalaisen ja Kellomäen (1991) mukaan puuston biomassaan on sitoutunut neljännes koko metsäekosysteemiin sitoutuneesta hiilestä. Suurin osa metsäekosysteemin hiilestä, lähes kolme neljäsosaa, on sitoutunut maaperään. Pintakasvillisuuden merkitys hiilen varastona on vähäinen.

3.3.2 Hiilen sitoutuminen eri toimialoille

Seuraavaksi esitetään puun (sisältää tuontipuun ja puun viennin) loppukäyttötarjonta ja sen jakautuminen lopputuotekäyttösektoreille Suomessa vuonna 1990. Taulukossa 6 puun käyttö on esitetty myös hiilisisältönä, jolloin nähdään raakapuun sisältämän hiilen jakautuminen eri sektoreille. Taulukot 5 ja 6 perustuvat Tilastokeskuksen luonnonvarainlinpidon puuainestilinpitoon ja erityisesti sen käyttötaseeseen. Käyttötaseen mukainen hiilitilinpitolaskelma on kokonaisuudessaan liitteessä 2.

Vuonna 1990 hakkuiden kautta metsistä poistuvaan raakapuuhun sisältyi hiiltä lähes 10,5 miljoonaa tonnia. Kun laskelmiin otetaan mukaan tuonnin, viennin ja varastojen muutosten vaikutukset, puun tarjonta eri toimialoille puun sisältämäksi hiileksi muutettuna oli yhteensä lähes 12 miljoonaa tonnia. Tästä eri toimialat käyttivät raaka-aineena prosesseissaan noin 10 miljoonaa tonnia ja lopputuotekäyttöön kohdentui 2 miljoonaa tonnia raakapuuta hiileksi muunnettuna.

Raakapuusta noin 90 prosenttia käytettiin polttopuuna sähkö-, kaasu- ja vesihuollossa, kotitalouksissa ja maataloudessa. Loput 10 prosenttia suoraan lopputuotekäyttöön kohdentuvasta puusta käytettiin lähes yksinomaan rakentamiseen.

Taulukko 5. Raakapuun sisältämän hiilen jakaantuminen eri käyttökoh-
teisiin, 1 000 tonnia.

	Tukkipuu	Kuitupuu	Polttopuu	Yhteensä
Kokonaistarjonta				
- Hakkuut	4542,1	5229,0	721,2	10492,4
- Tuonti	73,0	1223,5	6,4	1303,0
- Vienti	-60,1	-75,1	0,0	-135,2
- Varastot	21,5	214,7	0,0	236,1
Yhteensä	4576,5	6592,1	727,7	11896,2
Väliuotekäyttö				
- Syntyy sivutuotteena eri toimi- aloilla	4,3	19,3	4,1	27,7
- Käytetään eri toimialoilla	-4398,3	-6658,6	-132,4	11189,4
- Muu tarjonta	0,0	0,0	73,0	73,0
- Polttoon	0,0	0,0	1112,6	1112,6
- Hävikki/tilastovirhe	-56,4	62,2	95,5	102,3
Yhteensä	-4450,5	-6577,1	-37,4	11064,9
Tarjonta lopputuotekäyttöön	126,0	15,0	1880,4	2021,4
Lopputuotekäyttö				
- Maatalous	0,0	0,0	148,1	148,1
- Valmistalot	75,1	7,5	8,5	91,2
- Rak.mat. valmistus	26,8	3,0	7,5	37,4
- Huonekalut	2,6	0,0	11,8	14,4
- Paperituotteet	0,0	0,0	0,0	0,0
- Painaminen/kustannustoiminta	0,0	0,0	0,0	0,0
- Muu teollisuus	1,1	0,0	8,6	9,7
- Sähkö-, kaasu- ja vesihuolto	0,0	0,0	944,5	944,5
- Rakentaminen	20,4	4,5	0,0	20,4
- Kauppa ja liikenne	0,0	0,0	6,4	6,4
- Julkinen toiminta	0,0	0,0	34,3	34,3
- Kotitaloudet	0,0	0,0	710,5	710,5
Yhteensä	126,0	15,0	1880,4	2021,4

Polttopuuhun sitoutuneen hiilen elinkaari on lyhyt. Puu poltetaan yleensä vuoden tai parin kuluessa metsästä korjaamisen jälkeen, jolloin siihen yhteyttämisessä sitoutunut hiili vapautuu kokonaisuudessaan takaisin ilmakehään. Sahatavaraan sitoutunut hiili sen sijaan säilyy kokonaisuudessaan varastoituneena elinkaarianalysien mukaisesti noin 80 vuotta. Sitten sahatavaran/rakennusten lahoaminen ja hajoaminen kestää toiset 80 vuotta. Tämän jälkeen hiili on taas kokonaisuudessaan vapautunut takaisin ilmakehään. Ilmeisesti sahatavaraa kuitenkin poltetaan ja lahoaa jonkin verran jo käyttöiän kuluessa, toisin kuin elinkaarianalyyseissä on monesti oletettu.

Osa sahatavarasta käytetään huonekalujen valmistamiseen. Hiilen elinkaari huonekaluissa kestää noin 20 vuotta huonekalujen käyttöiän mukaisesti. Tämän jälkeen huonekalujen hajoaminen/lahoaminen vie aikaa noin 50 vuotta.

Puun kokonaistarjonta laskettiin puuainestilipidon metsätaseesta saadun puuston nettovahkuumäärän ja Metsätalastollisen vuosikirjan (Folia Forestalia 790) raaka- ja jätetuon tuonti- ja vientilukujen perusteella. Metsätalastollisesta vuosikirjasta ja Metsätalastotiedotteesta (nro 171) saatiin

Taulukko 6. Eri teollisuustoimialojen puunkäyttö.

Teollisuuslaji	Puunkäyttö, milj. m ³ (sis. koti- ja ulkomainen)					
	Raakapuu		Jätepuu		Kokonaiskäyttö	
	milj. m ³	milj. t C	milj. m ³	milj. t C	milj. m ³	milj. t C
Sahaus/höyläys	17,63	3,74	0	0	17,63	3,74
Vaneri	2,13	0,52	0	0	2,13	0,52
Lastulevy	0	0	0,87	0,20	0,87	0,20
Kuitulevy	0,01	0	0,24	0,05	0,25	0,05
Mekaaniset massat	9,21	1,89	1,4	0,28	10,61	2,17
Kemialliset massat	21,34	4,72	4,69	1,04	26,03	5,76
Muu teollisuus	0,54	0,12	0	0	0,54	0,12
Teollisuus yhteensä	50,86	11,0	7,2	1,56	58,06	12,56
Kiinteistöt ym.	3,79	0,90	0	0	3,79	0,90
Yhteensä	54,65	11,90	7,2	1,56	61,85	13,46

teollisuuden ja kiinteistöjen puunkäyttötiedot. Teollisuus jaettiin seitsemään toimialaan, joita ovat saha-, vaneri-, lastulevy-, kuitulevy-, mekaaninen massa-, kemiallinen massa- ja muu teollisuus. Näiden toimialojen puunkäyttö esitetään taulukossa 6, jossa kunkin toimialan puunkäyttömäärän lisäksi on esitetty puun sisältämä hiili.

Puumassateollisuus on ylivoimaisesti suurin puunkäyttävä. Sen osuus kokonaiskäytöstä on 60 prosenttia. Seuraavaksi suurin puunkäyttävä on saha- ja höyläysteollisuus, jonka puunkäyttö on lähes 30 prosenttia puun kokonaiskäytöstä. Kolmas merkittävä puunkäyttävä on mekaanisten massojen valmistus, jonka osuus puunkäytöstä on vajaat 20 prosenttia. On huomattava, että saha- ja höyläysteollisuuden puuraaka-aine on kokonaisuudessaan raakapuuta, kun taas kemiallinen metsäteollisuus käyttää mm. sahatteollisuuden sivutuotteita (esimerkiksi sahanpuru ja pinnoista syntyvä hake) raaka-aineenaan. Taulukon 6 luvut sisältävät näin ollen kaksinkertaista laskentaa.

3.3.3 Toimialojen väliset hiilivirrat

Seuraavaksi selvitettiin puun sisältämän hiilen kulku puunkäyttöprosessissa toimialoitain. Laskelmat perustuvat Tilastokeskuksen puuainestilinpidon puunkäyttö- ja massataseeseen (puunkäyttö- ja massatili). Toimialan käyttämä puu jakautuu lopputuotteisiin, sivutuotteisiin ja jäämiin sekä tilastovirheeseen/hävikkiin. Lopputuotteen kulku eri loppukäyttösektoreille sekä sivutuotteen kulku toisille puunkäyttösektoreille laskettiin puuainestilinpidon käyttötaseesta (käyttötili). Hiilisisältö jakautuu eri käyttökohteille puunkulun suhteen mukaisesti. Taulukossa 7 esitetään toimialojen väliset hiilivirrat. Puuainestilinpidon massataseen (massatili) mukainen hiilitilinpitolaskelma kokonaisuudessaan on liitteenä 3.

Suuri osa maassamme jalostusprosesseissa tuotteisiin sitoutuneesta hiilestä kulkeutuu vientituotteina ulkomaille. Kaikkiaan tuotannossa eri tuotteisiin sitoutuu hiiltä lähes 10 miljoonaa tonnia, josta viennin seurauksena maamme rajojen ulkopuolelle siirtyy lähes 5 miljoonaa tonnia. Koti-

Taulukko 7. Eri puunkäyttötoimialojen hiilivirrat, 1 000 tonnia.

	Sahata- vara	Vaneri	Lastu- levy	Kuitu- levy	Mek. massa	Kem.- massa	Paperi/ kart.	Jätteet
Tuotanto	1565,54	262,11	149,28	45,08	1923,13	2395,84	3374,30	0,0
Tuonti	12,27	7,34	7,10	11,27	10,84	12,07	67,43	0,0
Vienti	-882,84	-219,72	-52,22	-21,60	-28,90	-652,48	-2899,68	0,0
Varastot	-10,58	-1,22	-1,14	-0,94	0,0	-3,72	7,53	0,0
Yhteensä	684,40	48,51	103,02	33,81	1905,07	1751,72	549,58	0,0
Syntyy sivutuotteena eri toimialoilla	11,85	3,26	4,54	0,0	0,0	0,0	0,0	3124,38
Käytetään eri toimi- aloilla	-92,24	-12,23	-0,57	-4,70	-1896,82	-1690,42	-151,43	-2969,06
Muu tarjonta	3,38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polttoon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hävikki/tilastovirhe	-84,84	-14,68	-13,05	-4,70	0,0	0,0	15,07	-152,43
Yhteensä	-161,84	-23,64	-9,08	-9,39	-1869,82	-1690,42	-136,36	2,89
Tarjonta	522,55	24,87	93,94	24,42	8,26	61,30	413,22	2,89
Lopputuotekäyttö	522,55	24,87	93,94	24,42	8,26	61,30	413,22	2,89
Maatalous	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Valmistalot	95,20	1,63	5,68	2,35	0,0	0,0	0,0	0,0
Rak.mat. valmistus	95,20	6,11	18,16	2,35	0,0	0,0	0,38	0,0
Huonekalut	23,27	3,67	39,73	3,29	0,0	0,0	0,38	0,0
Paperituotteet	0,0	0,0	0,0	0,0	8,26	19,97	188,34	0,0
Painaminen/kustan- nustoiminta	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	201,52	0,0
Muu teollisuus	12,69	2,04	1,99	0,0	0,0	41,33	22,60	2,89
Sähkö-, kaasu- ja vesihuolto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rakentaminen	296,18	11,41	28,38	16,43	0,0	0,0	0,0	0,0
Kauppa ja liikenne	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Julkinen toiminta	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kotitaloudet	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

maassa lopputuotekäyttönä hiiltä sitoutuu eri käyttökohteisiin noin 1,2 miljoonaa tonnia. Loput tuotteisiin sitoutuneesta hiilestä kohdentuu eri toimialoille toisten tuotteiden valmistukseen (sivutuotteet). Suuresta osasta syntyy jätettä, joka käytetään pääosin energian tuotantoon.

Merkittävin hiiltä sitova loppukäyttökohde maassamme on sahatavaran käyttö rakentamiseen eri sektoreilla: lähes puolet kotimaahan jäävien lopputuotteiden hiilisisällöstä sitoutuu rakentamiskohteisiin. Toinen merkittävä hiilensitoja Suomessa ovat paperi- ja kartonkituotteet, joihin sitoutuu noin 35 prosenttia kotimaahan jäävästä tuotteiden hiilisisällöstä.

Puuainestilinpidon mukaisten hiilitilinpitotaulukoiden tulkitseminen sellaisenaan on työlästä. Sen vuoksi seuraavassa luvussa pyritäänkin havainnollistamaan hiilen kiertokulkua toimialoittain kiertokulkukaavioiden ja elinkaarianalyysin avulla.

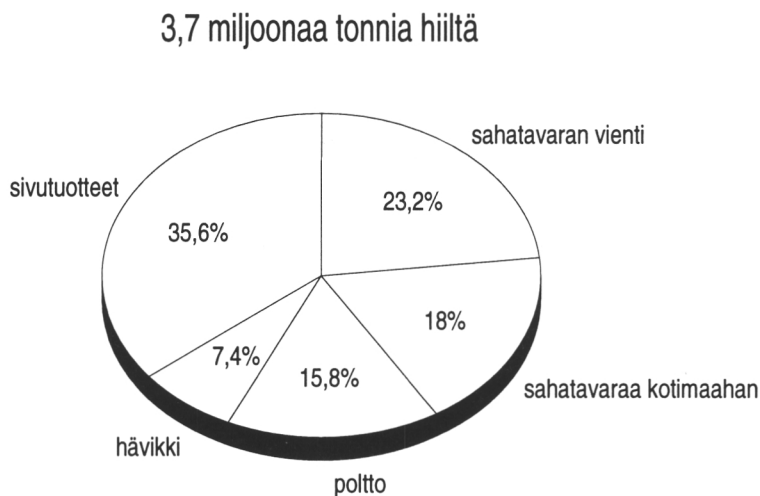
3.4 Hiilen kiertokulku puunkäytössä

3.4.1 Sahatavaran valmistus

Sahateollisuuden vuonna 1990 käyttämän 17,6 miljoonan kuutiometrin puumäärän hiilisisältö oli 3,75 miljoonaa tonnia (Kuva 7). Toimialan päätuotteeseen, sahatavaraan sitoutui runsaat 1,5 miljoonaa tonnia eli hieman yli 40 prosenttia koko hiilimäärästä. Sahatavaratuotannosta vietiin 56 % eli 1,7 miljoonan tonnin edestä puuhun sitoutunutta hiiltä. Sahoilla poltettiin kuorta sekä jonkin verran haketta ja purua lähinnä sahatavaran kuivausten lämpöenergiaksi yhteensä vajaa kuudennes (15,8 prosenttia) puuraaka-aineesta eli lähes 0,6 miljoonaa hiilitonnia. Poltossa puusta vapautui ilmakehään hiilidioksidia 2,2 miljoonaa tonnia, mikä on noin kolme prosenttia Suomen tunnetuista hiilidioksidin kokonaispäästöistä.

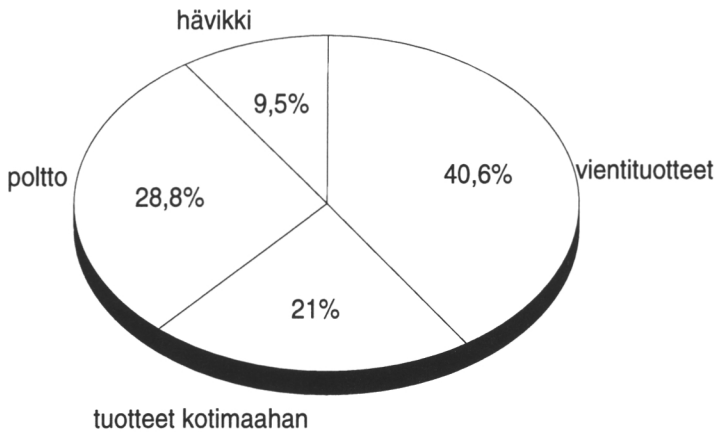
Hävikin ja tilastovirheen osuus oli 7,4 prosenttia puunkäytöstä, mikä vastaa lähes 0,3 miljoonaa hiilitonnia. Tilastoissa raportoitu hävikki sisältää tuntemattomiin kohteisiin päätyvien erien lisäksi tilastovirheen. Tämän analyysin johtopäätöksissä hävikki kohdennetaan polttoon ja sekä kotimaassa että ulkomailla käytettyihin lopputuotteisiin niiden suhteellisten osuuksien mukaisesti.

Sivutuotteisiin meni runsas kolmannes (35,6 prosenttia eli 6,3 miljoonaa kuutiometriä) käytetystä raakapuusta. Sivutuotteiden sisältämä hiilimäärä oli runsas 1,3 miljoonaa tonnia. Sivutuotteet käytettiin lähinnä puumassateollisuuden raaka-aineena, mutta myös jonkin verran lastu- ja kuitulevyteollisuudessa. Näillä toimialoilla sahteollisuuden hakkeesta ja purusta runsas puolet eli 0,75 miljoonaa hiilitonnia sitoutui lopputuotteisiin, ts. puumassaan sekä lastu- ja kuitulevyihin. Polttoaineeksi käytettiin

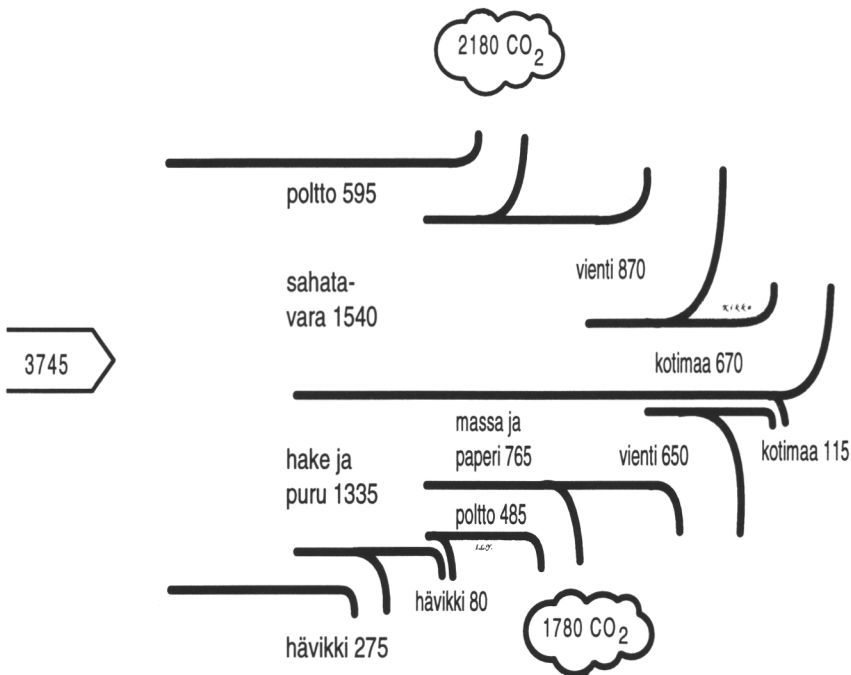


Kuva 7. Sahateollisuuden puuraaka-aineen kohdentuminen käyttöalotain vuonna 1990, ilman hakkeen ja purun jatkojalostusta.

3,7 miljoonaa tonnia hiiltä



Kuva 8. Sahateollisuuden käyttöön tulleen puuraaka-aineen kohdentuminen käyttöaloittain vuonna 1990, hakkeen ja purun jatkojalostus mukaan lukien.

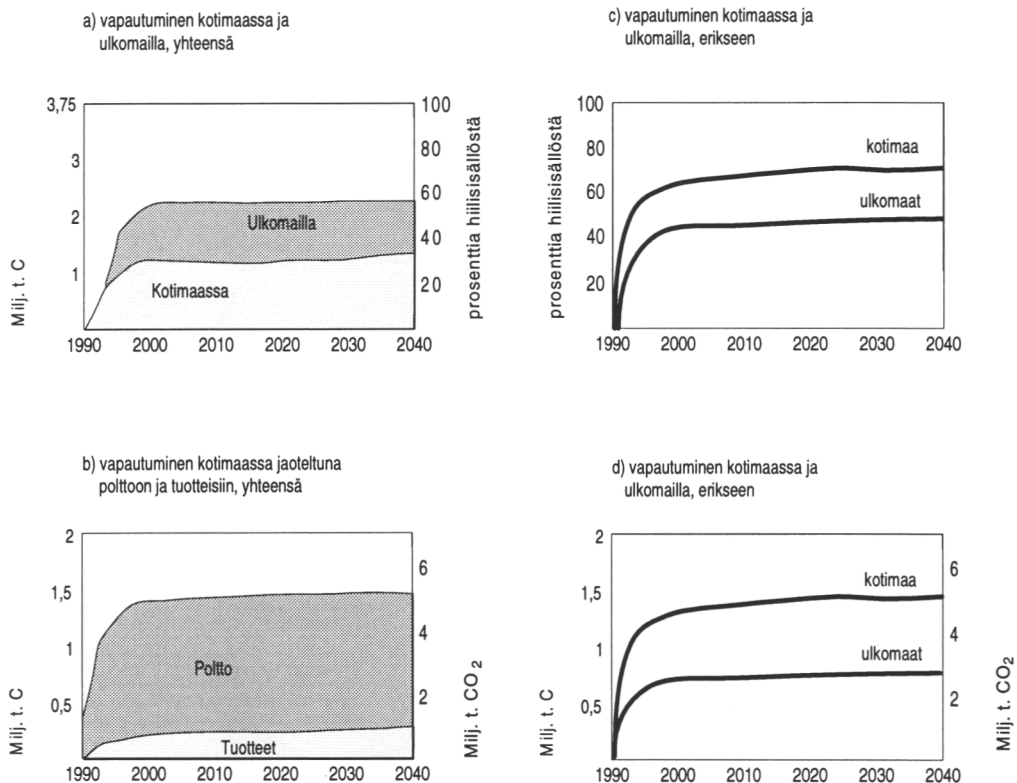


Kuva 9. Sahatukkiin sitoutuneen hiilen kulkuvirta vuonna 1990, 1 000 tonnia hiiltä.

Vuonna 1990 sahoilla poltettiin puuta miltei saman verran kuin sitä sitoutui valmiiseen sahatavaraan. Jos myös puumassan valmistuksessa energiakäyttöön kohdentunut sahojen hake ja puru otetaan huomioon, niin sahatukkiä poltettiin neljännes enemmän kuin sitä sitoutui sahatavaran vientiin. Polttoainekäytöstä kuitenkin lähes puolet oli puun kuorta.

sahahaketta ja -purua 0,5 miljoonan hiilitonnin edestä, mikä vastaa 1,8 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöjä ilmakehään.

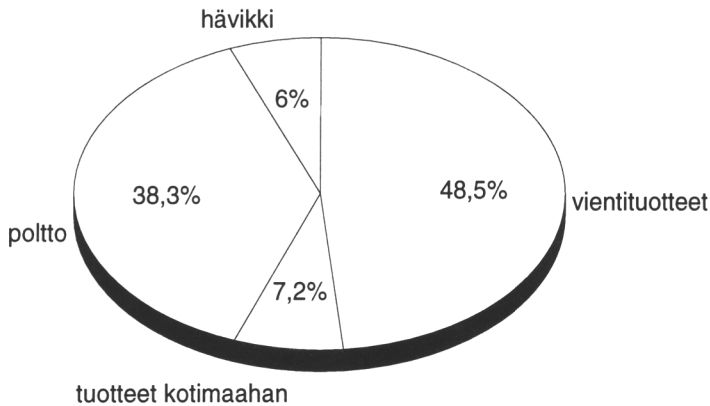
Kun sahateollisuuden käyttämän puuraaka-aineen kiertokulussa otetaan huomioon myös puumassa- sekä lastu- ja kuitulevyteollisuuden käyttämä sahaake ja sahanpuru, niin puuaineksesta ja sen sisältämästä hiilestä sitoutui lopputuotteisiin vuonna 1990 kolme viidesosaa (kuvat 8 ja 9). Viidennes käytettiin kotimaassa ja kaksi viidennestä vietiin ulkomaille. Polttoaineeksi meni runsas neljännes (28,8 prosenttia) eli vajaa 1,1 miljoonaa tonnia orgaanista hiiltä. Siitä ilmakehään vapautunut hiilidioksidimäärä



Kuva 10. Sahaukseen vuonna 1990 käytettyjen tukkien sisältämän hiilen vapautumisen kehitysarvio vuoteen 2040.

Vaikka sahatavaran elinkaari Aalstadin (1990a) analyysin mukaan on runsaat 150 vuotta, niin ensimmäisen viiden vuoden kuluttua sahausksen jälkeen yli puolet sahatavaran valmistuksessa käytetyn puun hiilisäällöstä palautuu hiilidioksidina takaisin ilmakehään (kuva a). Hiili vapautuu aluksi puuta poltettaessa tuotantolaitoksilla (kuva b) ja sen jälkeen sahaakkeesta ja purusta valmistetuista massa- ja paperituotteista. Kotimaahan jäävästä puun hiilisäällöstä vapautuu alkuvuosien kuluessa suhteellisesti suurempi osuus kuin vientituotteisiin sitoutuneesta hiilestä (kuva c). Absoluuttisesti hiilidioksidipäästöt ovat aluksi yli kolmanneksen suuremmat kotimaassa kuin ulkomailta (kuva d).

7,7 miljoonaa tonnia hiiltä



Kuva 11. Puumassa- ja paperiteollisuuden puuraaka-aineen kohdentuminen käyttöaloittain vuonna 1990.

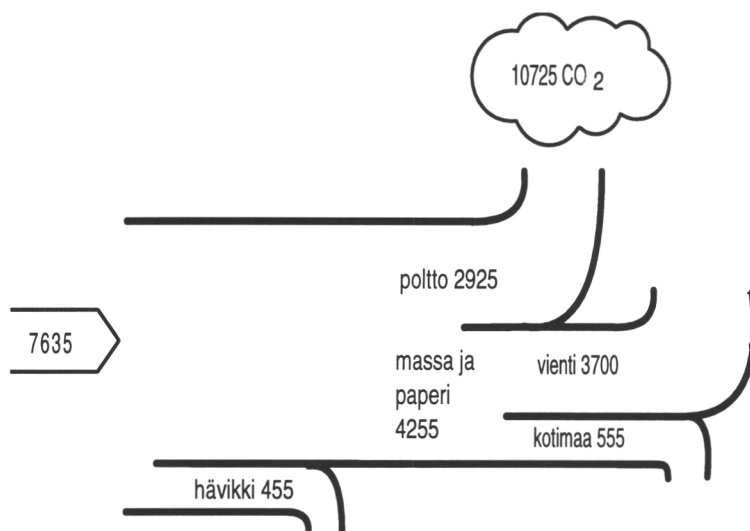
oli 4 miljoonaa tonnia eli noin viisi prosenttia Suomen tunnetuista hiilidioksidipäästöistä. Hävikin ja tilastovirheen osuus oli lähes 10 prosenttia.

Käyttämällä hyväksi aiemmin luvussa 3.2 esiteltyjä tuotteiden elinkaariarvioita voidaan ennustaa (jäljittää tulevaisuuteen) puuainekseen sitoutuneen hiilen kiertoa ja vapautumista hiilidioksidina takaisin ilmakehään. Kuvassa 10 on elinkaarikäyriin perustuva sahateollisuuden vuonna 1990 käyttämän puuaineksen sisältämän hiilen vapautumisen kehitysarvio ilmakehään seuraavien 50 vuoden aikana eli vuoteen 2040.

Sahateollisuuden raaka-aineeksi vuonna 1990 kohdentuneen puun sisältämästä orgaanisesta hiilestä puolet eli noin 2 miljoonaa tonnia vapautuisi kehitysarvion mukaan takaisin ilmakehään viiden ensimmäisen vuoden aikana eli vuoteen 1995 mennessä. Ilmakehän hiilidioksidina se vastaa runsasta 7 miljoonaa tonnia. Kaksi kolmannesta tästä määrästä vapautuu kotimaassa pääosin poltettaessa puuta energiakäyttöön. Viiden ensimmäisen vuoden jälkeen hiilen vapautuminen on hyvin hidasta ja vuonna 2040 vielä runsaat 40 prosenttia eli lähes 2 miljoonaa tonnia orgaanista hiiltä olisi varastoituneena sahatavaraan ja siitä valmistettuihin puurakenteisiin. Tästä hiilimäärästä noin puolet olisi kotimaassa ja puolet ulkomailta, lähinnä Euroopassa EY:n alueella.

3.4.2 Puumassan ja paperin valmistus

Puumassan valmistuksen osuus metsäteollisuuden ensikertaisen raaka-puun käytöstä on noin 60 prosenttia. Jos lähinnä sahateollisuudessa syntyvä hake ja puru otetaan huomioon puumassateollisuuden puunkäytössä, niin puumassan valmistuksen kautta kulkee yhteensä lähes kolme neljäsosaa (72 prosenttia) kaikesta metsäteollisuuden käyttämästä puuraaka-aineesta.



Kuva 12. Puumassateollisuuden puuraaka-aineeseen sitoutuneen hiilen kulkuvirta vuonna 1990, 1 000 tonnia hiiltä.

Sellunkeitossa syntyvien jätteiden talteenotto ja energiakäyttö ovat lisääntyneet. Puusta vapautuu yhä nopeammin hiiltä takaisin ilmakehään, mutta toisaalta fossiilisten polttoaineiden käyttö on vähentynyt. Tuotantoprosesseja kehitetään kohti ns. suljettua kiertoa, jolloin myös kiintoainepäästöt luontoon vähenevät.

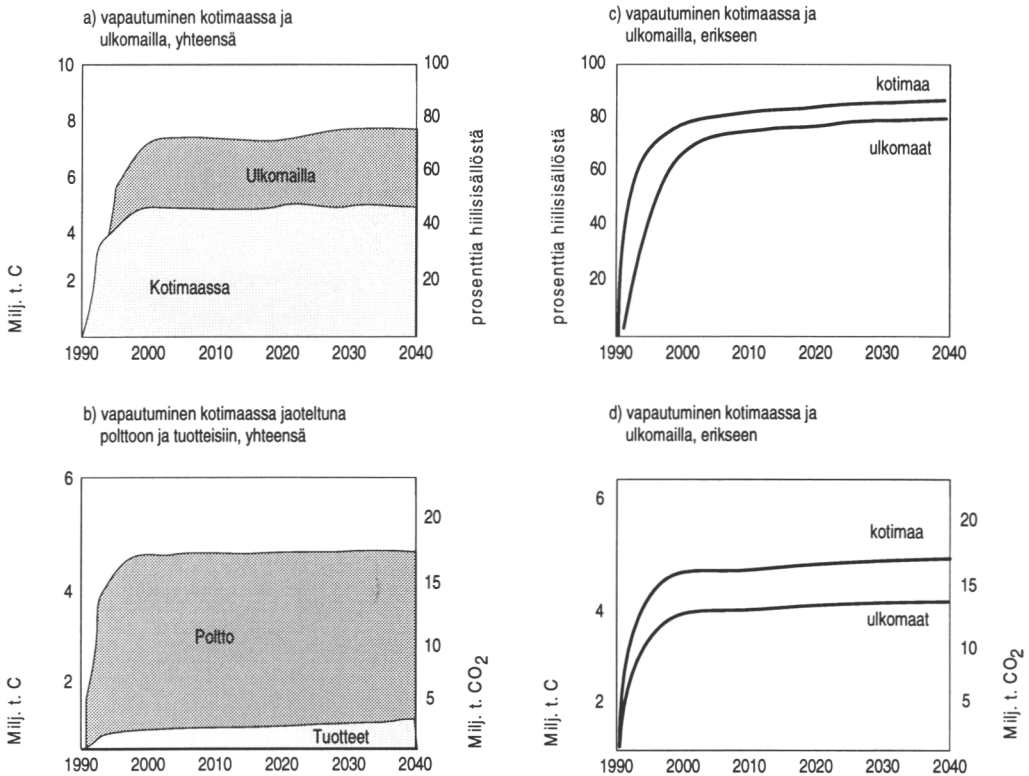
Puumassan ja paperin valmistukseen vuonna 1990 kohdentuneen, kaikkiaan 36,6 miljoonan puukuutiometrin sisältämän orgaanisen hiilen määrä oli 7,9 miljoonaa tonnia. Vajaa kaksi kolmasosaa tästä määrästä oli kotimaista raakapuuta, viidennes sahateollisuuden haketta ja purua sekä loput noin kuudennes eli runsaat 15 prosenttia tuontipuuta.

Massa- ja paperiteollisuuden puuraaka-aineen käytöstä miltei puolet sitoutui vientituotteisiin (Kuva 11). Polttoon meni lähes kaksi viidesosaa, mutta kotimarkkinatuotteisiin vain runsas 7 prosenttia. Hävikki oli 6 prosenttia. Poltossa vapautunut hiilidioksidimäärä oli lähes 11 miljoonaa tonnia, mikä on 15 prosenttia kaikista Suomen tunnetuista hiilidioksidipäästöistä.

Raaka-aineen runsaan energiakäytön ja lopputuotteen lyhyen elinkaaren johdosta jo parin ensimmäisen vuoden aikana valmistuksesta noin puolet puuraaka-aineen hiilisisällöstä on vapautunut hiilidioksidina ilmakehään. Vuoteen 1995 mennessä eli viiden ensimmäisen vuoden aikana vuonna 1990 tuotannossa käytetty puuraaka-aine olisi ehtinyt taivaltaa käytännöllisesti katsoen elinkaarensa päättepisteeseen. Osa paperista valmistetaan kuitenkin kirjoiksi ja muiksi pitkäikäisiksi painotuotteiksi tai säilytetään arkistoissa, joissa paperi säilyy vuosikymmeniä, jopa vuosisatoja. Elinkaarianalyysien mukaisesti tämä osuus massan ja paperin kokonaiskäytöstä on kuitenkin niin pieni, ettei sillä ole olennaista merkitystä massan ja paperin kiertokulun kokonaisuuteen.

Polttoainekäytön suuren osuuden vuoksi puun sisältämä hiili vapautuu ilmakehään valmistusprosessin yhteydessä ja välittömästi sen jälkeen

lähinnä kotimaassa. Kuitenkin jo viiden vuoden kuluttua valmistuksesta eli siis elinkaaren päättymiseen mennessä lähes puolet tuotantoprosessin kautta kulkeneen puuraaka-aineen hiilisisällöstä on vapautunut ilmakehän hiilidioksidiksi Suomen rajojen ulkopuolella, lähinnä EY:n alueella. Paperin talteenottoaste eli kierrätetyn paperin ja kulutetun paperin määrien suhde on Suomessa lähes 50 prosenttia. Noin puoli miljoonaa tonnia kotimaassa käytettyä keräyspaperia ja -kartonkia siis jalostetaan uudelleen paperituotteiksi. Kun tästä neljä viidesosaa viedään tuotteina ulkomaille, kohoo vientituotteisiin sitoutuneen puuraaka-aineen hiilen osuus massa- ja paperiteollisuudessa loppujen lopuksi runsaaseen 50 prosenttiin.

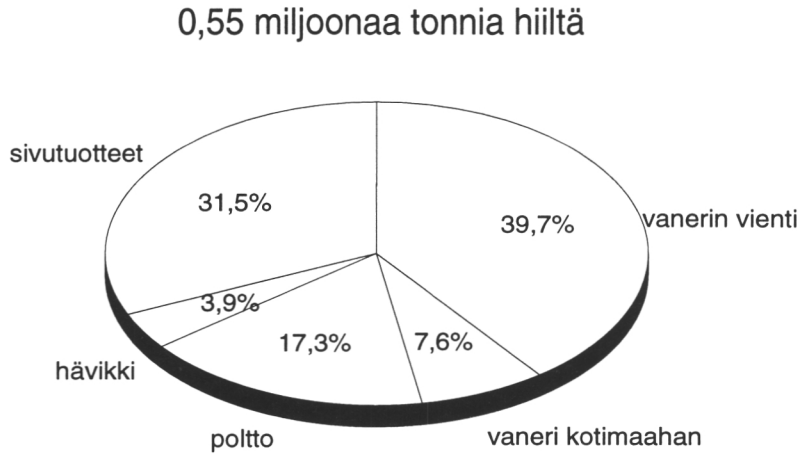


Kuva 13. Puumassa- ja paperiteollisuudessa vuonna 1990 käytetyn puuraaka-aineen sisältämän hiilen vapautumisen kehitysarvio vuoteen 2040.

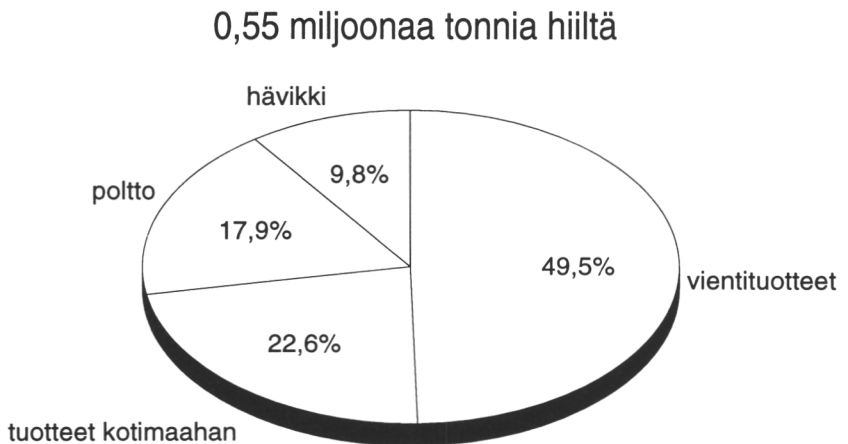
Massa- ja paperituotteiden elinkaari on lyhyt, yleensä alle viisi vuotta. Puuraaka-aineeseen varastoituneen hiilen kiertokulkua nopeuttaa edelleen puuperäisten jätteiden runsas polttoainekäyttö, joka on kaksi viidennestä kaikesta toimialan käyttämästä puuraaka-aineesta. Tästä syystä myös hiilen vapautuminen on aluksi nopeampaa kotimaassa kuin ulkomailla. Toimialan vientisuuntautuminen vuoksi raaka-aineeseen varastoituneesta hiilestä vapautuu hiilidioksidina ilmakehään loppujen lopuksi ulkomailla ikkimain yhtä paljon kuin kotimaassa.

3.4.3 Vanerin valmistus

Vanerin valmistukseen vuonna 1990 käytetty 2,1 miljoonaa kuutiometriä raakapuuta sisälsi noin 0,5 miljoonaa tonnia orgaanista hiiltä. Vaneriin tästä määrästä sitoutui lähes puolet, josta osuudesta puolestaan vientivareihin 80 prosenttia. Sivutuotteita tuotettiin kolmanneksesta raaka-ainemäärästä. Sivutuotteet menivät pääasiassa lastu- ja kuitulevyteollisuuden raaka-aineeksi. Puuraaka-aineen polton osuus oli vain vajaa viidennes.



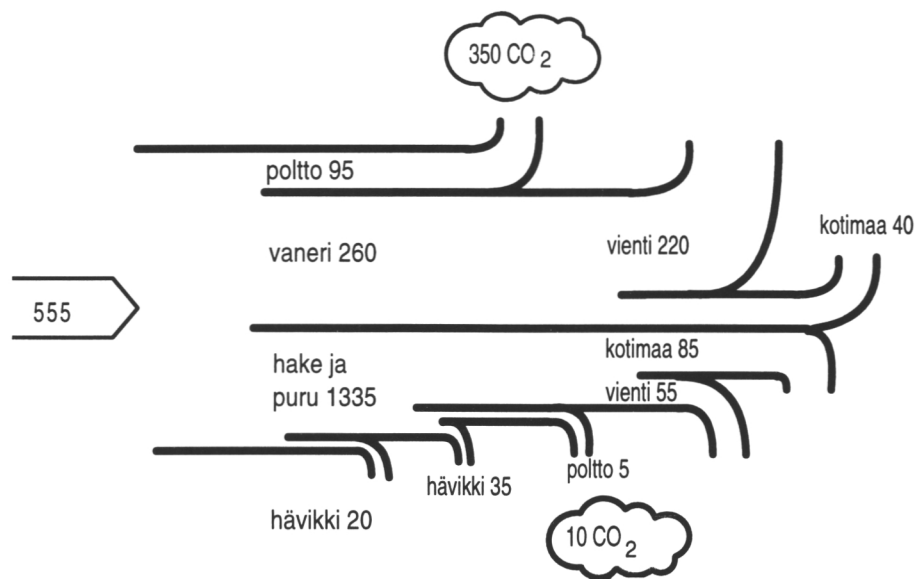
Kuva 14. Vaneriteollisuuden puuraaka-aineen kohdentuminen käyttöaloittain vuonna 1990, ilman hakkeen ja purun jalostusta.



Kuva 15. Vaneriteollisuuden puuraaka-aineen kohdentuminen vuonna 1990, hakkeen ja purun jalostus mukaan lukien.

Kun vaneriteollisuuden käyttämän puuraaka-aineen kiertokulussa otetaan huomioon myös lastu- ja kuitulevyteollisuuden käyttämät sivutuotteet, niin puuraaka-aineesta ja sen sisältämästä orgaanisesta hiilestä sitoutui lopputuotteisiin lähes kolme neljäsosaa (Kuva 15). Hävikki ja tilastovirhe huomioon ottaen runsas puolet puuraaka-ainekäytöstä sitoutui vientituotteisiin, lähes neljäsos kotimarkkinatuotteisiin ja noin viidennes poltettiin. Polttoaineeksi käytetyn puun 0,2 miljoonan tonnin hiilisisällöstä vapautui 0,7 miljoonaa tonnia hiilidioksidia, mikä on noin yksi prosentti Suomen kaikista tunnetuista hiilidioksidipäästöistä.

Elinkaarianalyysiin perustuvat ennusteet vanerin raaka-aineeksi käytetyn puun sisältämän hiilen varastoitumisesta ja vapautumisesta vuosina 1990–2040 on esitetty kuvassa 17. Viiden ensimmäisen vuoden aikana hiilestä vapautuu muista toimialoista poiketen vain vajaa viidennes. Seuraavan 15 vuoden aikana, ts. antropogeenisen eli käyttöiän aikana, hiilen vapautuminen on edelleen vähäistä ja vuoteen 2015 mennessä tuotteisiin varastoituneena olevasta orgaanisesta hiilestä vasta kolmannes on vapautunut. Sen jälkeen lahoaminen alkaa kiihtyä ja vuosien 2020–2025 tienoilla puolet varastoituneesta hiilestä on vapautunut. Vuoteen 2040 mennessä käytännöllisesti katsoen kaikki vuonna 1990 vaneriteollisuuden käyttämän puuaineen sisältämästä orgaanisesta hiilestä on elinkaarianalyysin mukaan palautunut hiilidioksidina takaisin ilmakehään.

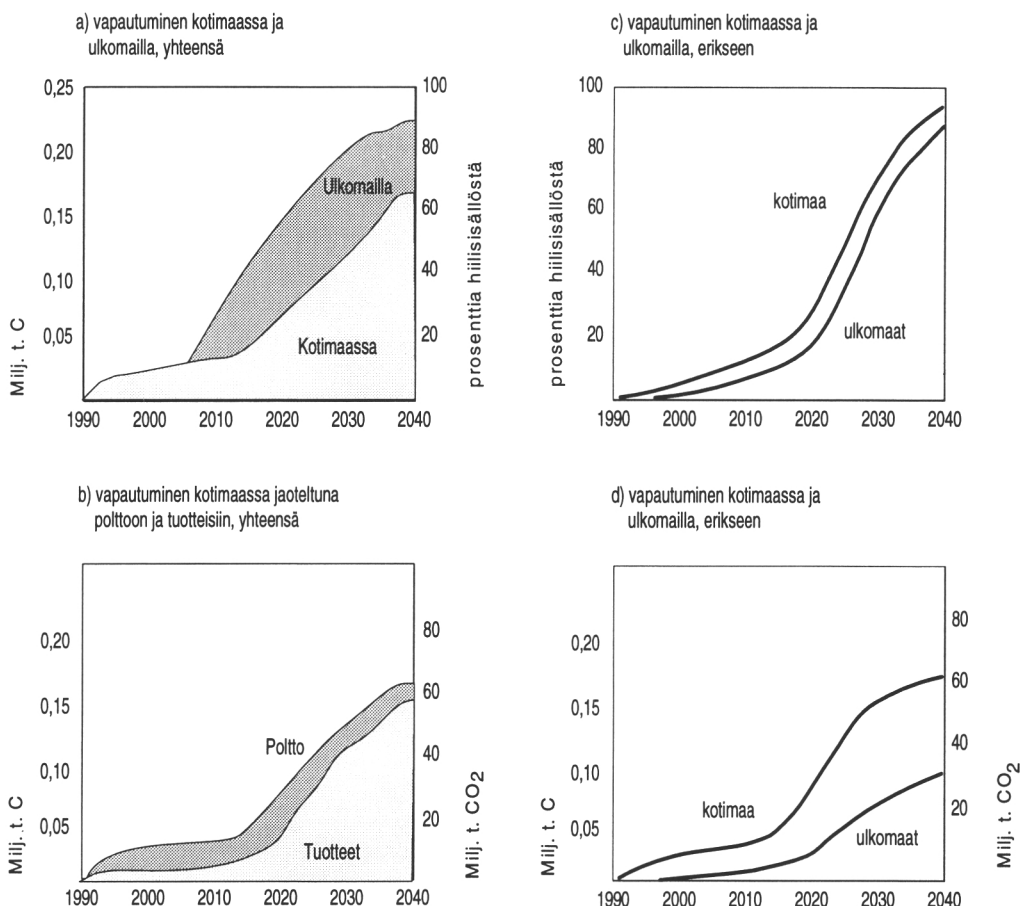


Kuva 16. Vaneritukkien käyttöön sitoutuneen hiilen kulkuvirta vuonna 1990, 1 000 tonnia.

Kun vaneriteollisuudessa syntyvän hakkeen ja purun käyttö lastu- ja kuitulevyjen valmistukseen otetaan huomioon, lopputuotteisiin sitoutuisi peräti miltei neljä viidesosaa puuraaka-aineen koko hiilisisällöstä. Todellisuus saattaa kuitenkin poiketa tilastojen osoittamasta. Ilmeisesti puuta poltetaan tilastoitua enemmän vanerituotannon energialähteenä.

Elinkaaren kahden ensimmäisen vuosikymmenen aikana hiili vapautuu vanerin valmistamiseen käytetystä puusta lähes yksinomaan Suomessa jalostuksen yhteydessä tapahtuvassa puun poltossa energiaksi. Vuoden 2010 jälkeen tuotteiden hiilidioksidipäästöistä kaksi kolmannesta vapautuu ulkomailla. Vuoteen 2040 kumulatiivisista hiilidioksidipäästöistä puolet on peräisin Suomesta ja puolet ulkomailta.

Vaneriteollisuuden käyttämän puuraaka-aineen elinkaari on muodoltaan varsin erilainen kuin sahateollisuuden (kuva 17). Sahateollisuuden raaka-aineesta puolet menee polttoon sekä lyhytikäisten massa- ja paperituotteiden valmistukseen. Vaneriteollisuudessa vastaava osuus on vain viidennes.



Kuva 17. Vaneriteollisuudessa vuonna 1990 käytettyihin tukkeihin varastoituneen hiilen vapautumisen kehitysarvio vuoteen 2040.

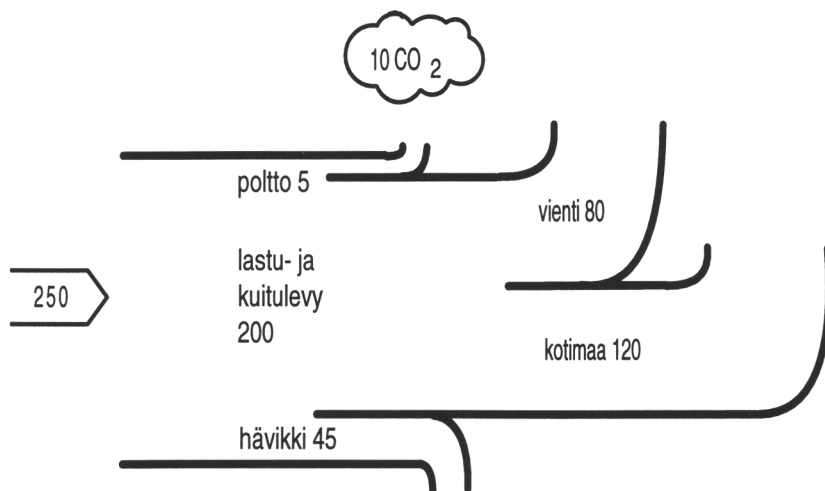
Vanerituotteet ehtivät käytännöllisesti katsoen elinkaarensa päätteeseen vuoteen 2040 mennessä. Puujätteen polttoainekäytön vuoksi elinkaari on polveileva. Vuoteen 2015 asti lähes kaikki vapautunut hiili on peräisin puun poltosta kotimaassa 1990-luvun alussa. 2020-luvun taitteesta lähtien hiiltä vapautuu vanerituotteista samaa tahtia sekä kotimaassa että ulkomailla.

Toisaalta päätuotteen eli vanerin sekä käyttöikä että lahoamisikä ovat huomattavasti lyhyemmät kuin sahatavaran. Viidessäkymmenessä vuodessa sahateollisuuden raaka-aineen sisältämästä hiilestä vasta kaksi kolmanesta on vapautunut ilmakehään. Vanerin raaka-aine on tänä aikana tullut käytännöllisesti katsoen elinkaarensa päätepisteeseen.

3.4.4 Lastu- ja kuitulevyjen valmistus

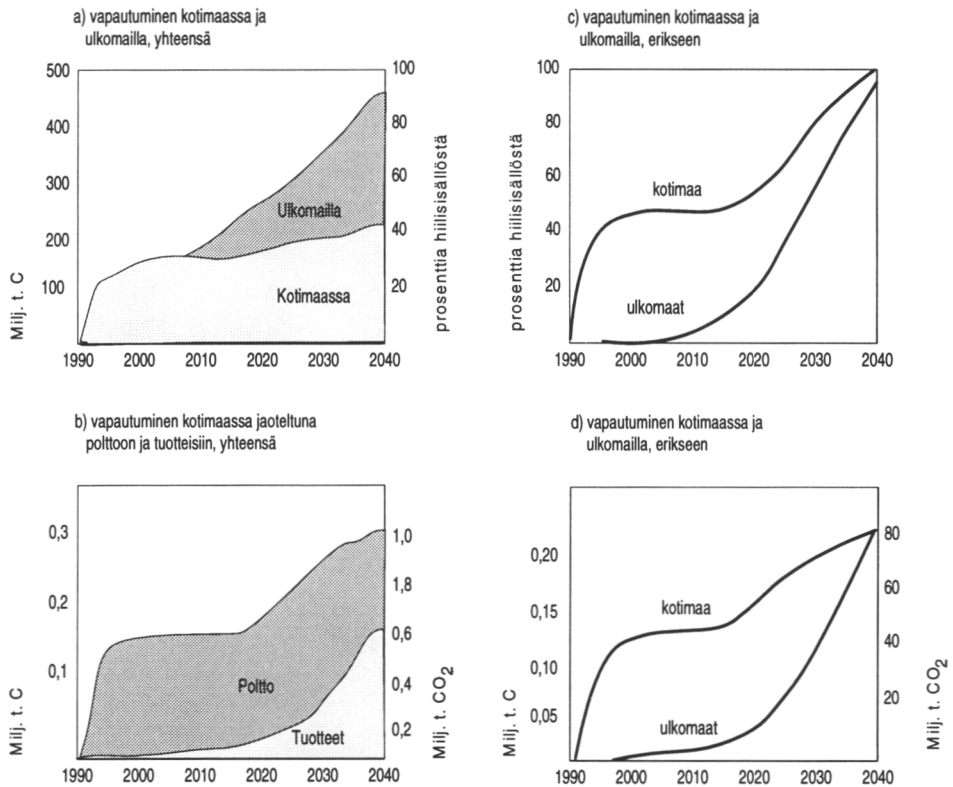
Lastu- ja kuitulevyteollisuus käyttävät pääasiassa vaneriteollisuuden ja pieniä määriä sahateollisuuden jättepuuta. Toimiala on suhteellisen pieni ja sen merkitys puun käytössä on vähäinen. Raaka-aineeksi käytettyyn puumäärään on sitoutunut 0,25 miljoonaa tonnia orgaanista hiiltä. Vajaa puolet tästä sitoutuu tuotannossa kotimarkkinatuotteisiin ja kolmannes vientituotteisiin hävikin ja tilastovirheen ollessa peräti viidennes. Polttoon menee puuainestilinpidon mukaan ainoastaan runsas prosentti puuraaka-aineesta.

Vähäisestä puun polttokäytöstä johtuen on vuoteen 2010 mennessä vain kymmenesosa vuonna 1990 käytetystä puuraaka-aineesta vapautunut takaisin ilmakehään hiilidioksidina. Antropogeenisen eli käyttöiän jälkeen noin vuodesta 2010 lähtien hiilen vapautuminen kiihtyy voimakkaasti



Kuva 18. Lastu- ja kuitulevyteollisuuden puuraaka-aineeseen sitoutuneen hiilen kulkuvirta vuonna 1990, 1 000 tonnia hiiltä.

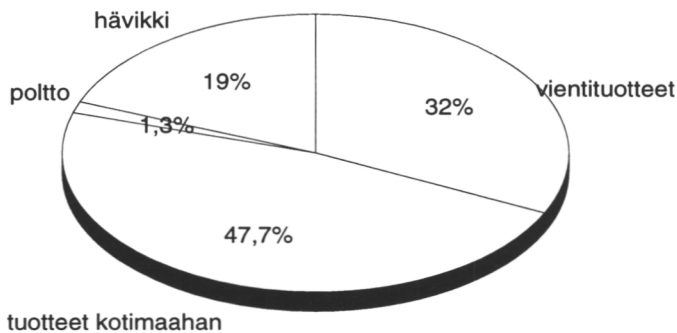
Lastu- ja kuitulevyteollisuus sitovat käyttämänsä raaka-aineen paljolti lopputuotteisiin. Tilaston mukaan hävikki on kuitenkin runsasta, mikä johtunee tuotantokoneiston ikääntyneisyydestä. Kaiken kaikkiaan puun käyttö suhteessa koko metsäteollisuuden puunkäyttöön on vähäistä.



Kuva 19. Lastu- ja kuitulevyteollisuudessa vuonna 1990 käytettyyn puuraaka-aineeseen varastoituneen hiilen vapautumisen kehitysarvio vuoteen 2040.

Myös lastu- ja kuitulevyt ehtivät vanerituotteiden lailla elinkaarensa päähän viidessä vuosikymmenessä. Puun vähäisen polttoainekäytön vuoksi hiilen vapautuminen parin ensimmäisen vuosikymmenen aikana on suhteellisen vähäistä. Koska tuotanto suuntautuu kotimarkkinoille voimakkaammin kuin metsäteollisuudessa yleensä, hiilidioksidistakin vapautuu kotimaassa peräti kaksi kolmannesta.

0,25 miljoonaa tonnia hiiltä



Kuva 20. Lastu- ja kuitulevyteollisuuden puuraaka-aineen kohdentuminen käyttöalottain vuonna 1990.

tuotteiden lahoamisen seurauksena. Vuoteen 2040 mennessä raaka-aineen elinkaari on jo hyvin lähellä päätepidistettään. Kaksi kolmannesta hiilen vapautumisesta tapahtuu Suomessa.

3.4.5 Koko metsäteollisuus

Koska massan ja paperin valmistus hallitsee metsäteollisuuden puuraaka-aineen käyttöä, myös koko metsäteollisuuden raaka-aineeksi käyttämän puun elinkaari myötäilee massa- ja paperiteollisuuden puuraaka-aineen elinkaarta (kuva 21).

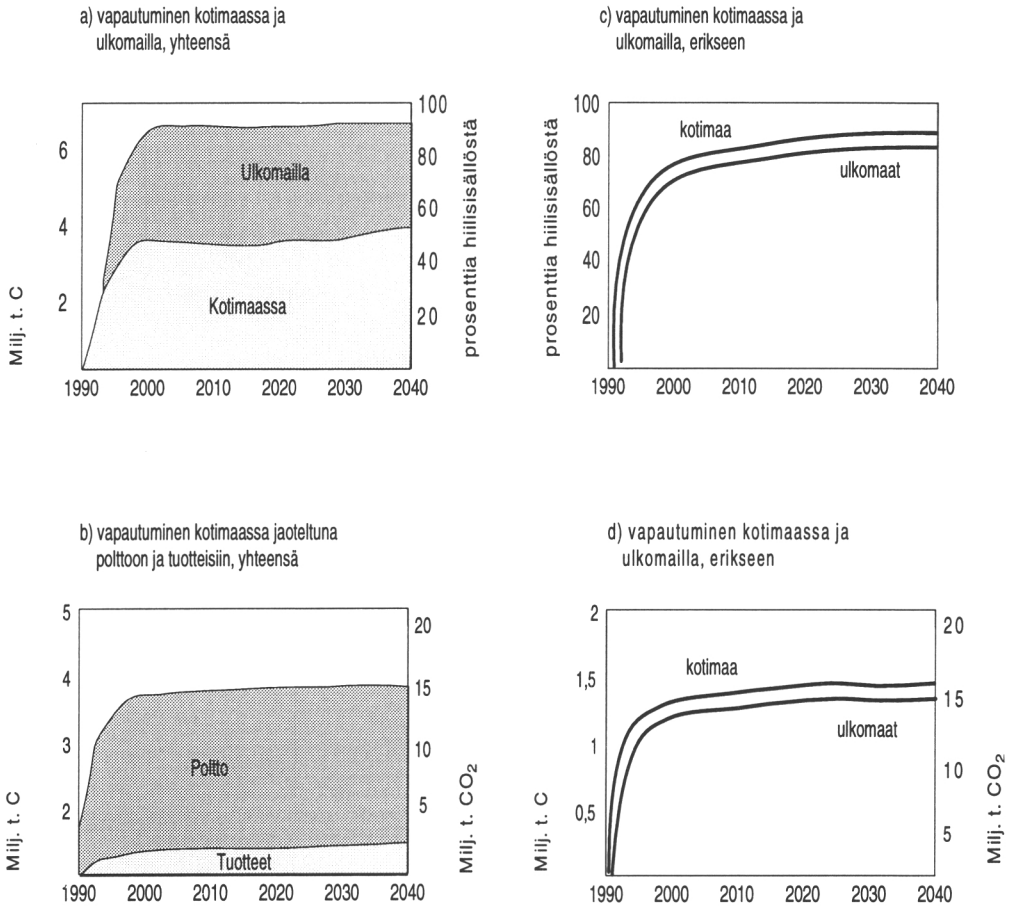
Metsäteollisuuden puuraaka-aineeseen sitoutuneesta, yhteensä 10,7 miljoonasta hiilitonnista lähes puolet sitoutuu vientituotteisiin, runsas kolmannes polttokäyttöön ja kotimarkkinatuotteisiin vain joka kahdeksas puukuutiometri. Massa- ja paperituotteiden osuus tuotantoon sitoutuneesta puuraaka-aineesta on 40 prosenttia, sahatavaran vajaat 15 prosenttia ja puulevyjen noin 4 prosenttia.

Puuraaka-aineen sitomasta hiilestä vapautuu välittömästi tuotannon yhteydessä tapahtuvassa poltossa runsas kolmannes, mikä vastaa yli 13 miljoonaa hiilidioksiditonnaa. Se on lähes 19 prosenttia eli vajaa viidennes Suomen kaikista tunnetuista hiilidioksidipäästöistä. Viiden vuoden kuluttua valmistuksesta eli vuoteen 1995 mennessä kolme neljäsosaa hiilestä olisi vapautunut hiilidioksidina ilmakehään, mistä kotimaassa tapahtuvien hiilidioksidipäästöjen osuus olisi noin 40 prosenttiyksikköä.

Vientituotteiden sisältämän puuaineksen hiilestä lähes kolme neljänestä vapautuu viiden ensimmäisen vuoden kuluessa tuotteiden valmistuksesta. Kotimaahan jäävän puuaineksen hiilisisällöstä vapautuu saman ajan kuluessa neljä viidesosaa. Kotimarkkinatuotteiden (pl. puun poltto) elinkaari sen sijaan on pitkä verrattuna vientituotteiden yhteenlaskettuun elinkaareen. Viennin tuoterakenne painottuu paperituotteisiin ja kotimarkkinoiden tuoterakenne puutuotteisiin, erityisesti sahatavaraan. Viiden ensimmäisen vuoden jälkeen vielä noin 60 prosenttia kotimarkkinatuotannon puuaineksen sisältämästä hiilestä on varastoituneena tuotteisiin (kuva 21). Vuoteen 2040 mennessä olisi kotimarkkinatuotteisiin sitoutuneesta hiilestä elinkaarianalyysin perusteella vasta noin puolet vapautunut ilmakehään.

3.4.6 Muu kuin teollisuuden puunkäyttö

Muu kuin teollisuuden kotimainen puunkäyttö vuonna 1990 oli 3,8 miljoonaa kuutiometriä ja sen hiilisisältö noin 0,8 miljoonaa tonnia. Kun polttopuun osuus siitä oli 85 prosenttia, muun kuin teollisuuspuun sisältämä hiilikin vapautui suurelta osin ilmakehään pian hakkuiden jälkeen. Ilmakehän hiilidioksidimäärää vapautuminen lisäsi noin 2,5 miljoonalla tonnilla. Jos vapautumisen oletetaan tapahtuneen pääosin yhden vuoden kuluessa, niin se vastasi runsasta kolmea prosenttia kaikista Suomen tunnetuista hiilidioksidipäästöistä vuonna 1990.



Kuva 21. Koko metsäteollisuudessa vuonna 1990 käytetyn puuraaka-aineen sisältämän hiilen vapautumisen kehitysarvio vuoteen 2040.

3.4.7 Puun kokonaiskäyttö

Metsäteollisuus vastaa 85 prosenttia puun kokonaiskäytöstä Suomessa. Viennin osuus metsäteollisuuden tuotannon arvosta on kolme neljäsosaa. Siitä huolimatta vientituotteisiin sitoutuu vain vajaa puolet puun kokonaiskäytöstä. Tämä johtuu siitä, että metsäteollisuuden käyttämästä puusta runsas kolmannes menee viime kädessä polttoon. Puun kokonaiskäytöstä Suomessa 1990 ohjautui polttoon noin 40 prosenttia ja muuhun loppukäyttöön kotimaassa vajaan 15 prosenttia. Lähes 85 prosenttia puun poltosta tapahtuu metsäteollisuudessa tuotantoenergiaksi.

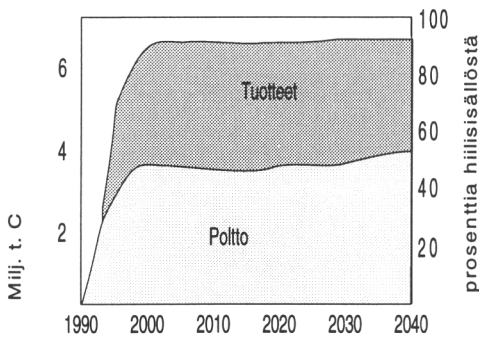
Kaiken kaikkiaan käyttöön tulevan puun elinkaari on käytettävissä olevien elinkaariarvioiden perusteella laskien jopa yllättävän lyhyt. Jo viidessä vuodessa puuhun sitoutuneesta hiilestä lähes 80 prosenttia on vapautunut

hiilidioksidina takaisin ilmakehään. Toisaalta sen jälkeen vapautuminen on hyvin hidasta.

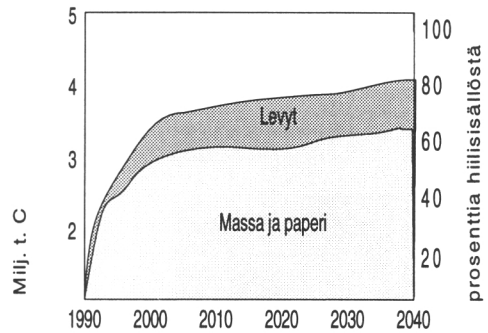
Onko sitten puun polttaminen puunjalostuksen yhteydessä järkevää niin kuin se nykyään Suomessa tapahtuu? Hiilitaseen kannalta hiiltä pitäisi varastoitua puuhun nykyistä enemmän pitkäikäisiin tuotteisiin, kuten sahatavaraan ja rakennuslevyihin.

Muutoin kehitys teollisuudessa vaikuttaa pääosin järkiperäiseltä niin lii- ketaloudellisesti kuin myös hiilitaseen ja ympäristötalouden kannalta. Ennen aikaan sahatteollisuuden kuori ja rimat jätettiin mätänemään tai poltettiin ”rimahelveteissä”, jolloin niiden energia ja myöskin orgaaninen hiili vapautuivat taivaan tuuliin. Nyt kuori poltetaan kuivaamojen lämpö- energiaksi. Varastojen kierto nopeutuu ja käyttöpääoman tarve pienenee. Purun ja rimoista tehdyn hakkeen myynnistä sahat saavat nykyään jo vii- denneksen tuotantonsa myyntiarvosta.

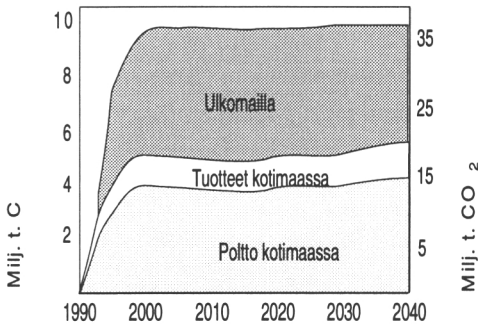
a) hiilenvapautuminen poltosta ja tuotteista, yhteensä



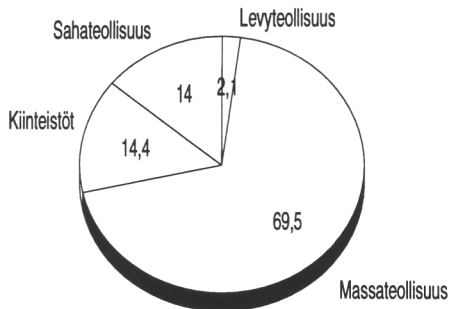
b) Hiilen vapautuminen tuotteista, yhteensä



c) hiilen vapautuminen kotimaassa ja ulkomailla, yhteensä



d) hiilen vapautuminen poltossa, toimialoitain



Kuva 22. Suomessa vuonna 1990 käytetyn puuraaka-aineen sisältämän hiilen vapautumisen kehitysarvio vuoteen 2040.

Massa- ja paperiteollisuuden kiintoainepäästöt putosivat 1970- ja 1980-luvun aikana vajaaseen viidesosaan. Erityisesti vesistöihin kohdistunut saastekuorma pieneni olennaisesti. Lisääntynyt jätelienten polttokäyttö on tehnyt selluteollisuudesta — kun puuperäisiä polttoaineita ei oteta huomioon — energian suhteen enemmän kuin omavaraisen. Paperiteollisuudessakin energiatalous on tehostunut tuotantoprosessien kehittyessä kohti suljettua kiertoa.

4 Hiilitase, metsäsektori ja kansantalous

4.1 Puun energiakäyttö

Puun energiakäytön lisääminen on jälleen kerran noussut päivänpolttavaksi keskustelunaiheeksi. Syynä on yhtäältä energiapoliittisten vaihtoehtojen luotaaminen ja toisaalta pyrkimys tehostaa nuorten metsien hoito-
toita ja hakkuita metsien terveyden ja tuottokunnan ylläpitämiseksi. On puhuttu jopa koko kansantaloutta elvyttävistä puunpoltto-ohjelmista, jotka korostavat puun polton ns. vihreitä arvoja biopolttoaineena (esim. Palo ja Petäjistä 1991, Pohjonen 1993). Paitsi että puun käyttö energian raaka-
aineena merkitsisi piristysruisketta työllisyydelle ja aluetaloudelle, se olisi myös ympäristöystävällinen, vihreä energiapoliittinen valttikortti.

Hiilitaseen kannalta puun polttaminen energiantuotannossa verrattuna muihin polttoaineisiin ei kuitenkaan vaikuttaisi kovinkaan edulliselta. Puun päästökerroin on korkea laskettuna hiilidioksidipäästöjen sisältämän hiilimäärän suhteena tuotettua energiayksikköä kohti (taulukko 8). Poltettaessa puuta vapautuu yhtä tuotettua energiayksikköä kohti maakaasuun verrattuna kaksinkertainen ja öljyynkin verrattuna keskimäärin puolitoistakertainen määrä hiilidioksidia ilmakehään. Kivihiilen etu puuhun verrattuna on vajaa 15 prosenttia.

Taulukko 8. Tärkeimpien polttoaineiden hiilidioksidin ominaispäästöker-
toimet.

Päästökerroin ilmaisee hiilidioksidipäästöjen sisältämän hiilimäärän tuotettua energiayksikköä kohti (taulukossa tonnia hiiltä/ekvivalentti öljytonni). Taulukon ominaispäästökertoimet ovat yleisesti käytettyjä (esim. Jantunen ja Nevanlinna 1990, s. 134) keskimääräisiä kertoimia, jotka todellisuudessa vaihtelevat polttoaine-erittäin mm. niiden sisältämien lisäaineiden mukaan.

Polttoaine	Päästökerroin (tC/toe)
Kivihiili	1,05
Öljy	0,77
Maakaasu	0,6
Biomassa (puu)	1,20

Ominaispäästökerrointen avulla voidaan tehdä teoreettisia laskelmia energiantuotannon rakennevaihtoehtojen vaikutuksista hiilitaseeseen. Puulla ja puuperäisillä polttoaineilla tuotettiin Suomessa vuonna 1990 kulutetusta primäärienergiasta lähes 15 prosenttia (Taulukko 9, jossa puulla tuotettu

Taulukko 9. Primäärienergian kokonaiskulutus energialähteittäin 1990 (Energiatilastot 1990).

Energialähde	Määrä 1 000 toe	Osuus %
– Öljy	9 150	30
– Hiili	3 250	11
– Maakaasu	2 255	7
– Ydinvoima	4 537	15
– Sähkön nettotuonti	2 688	9
Tuontienergia yhteensä	21 880	72
– Vesivoima	2 691	9
– Turve	1 238	4
– Muut kotimaiset	4 500	15
Kotimaiset yhteensä	8 429	28
Energia yhteensä	30 309	100

energia sisältyy kohtaan ”Muut kotimaiset”). Jos vuonna 1990 Suomessa puulla tuotettu energiamäärä olisi voitu korvata vesi- tai ydinvoimalla, hiilidioksidin kokonaispäästöt ilmakehään olisivat olleet neljänneksen toteutuneita pienemmät. Puuenergian korvaaminen maakaasulla olisi vähentänyt hiilidioksidipäästöjä runsaalla 12 prosentilla sekä öljyllä vastaavasti vajaalla 10 prosentilla. Laskelmat perustuvat keskimääräisiin päästökerrotimeihin, mutta havainnollistanevat energiatuotannon rakenteen vaikutusta hiilitaseeseen. Käytännössä energiamuotojen korvattavuus keskenään on usein hankalaa eikä se voi tapahtua kovin nopeasti.

Teoreettiset laskelmat osoittavat, että jos puu olisi korvattu maakaasulla, niin useimmin käytetyn laskentaperiaatteen mukaisesti (puuenergian hiilidioksidipäästöjä ei noteerata, koska vastaava määrä hiiltä sitoutuu metsien kasvuun, ks. luku 2.3, s. 15) Suomen hiilidioksidipäästöt olisivat lisääntyneet noin 9 miljoonalla tonnilla eli 54 miljoonasta 63 miljoonaan tonniin. Todellisuudessa, kun myös puuenergian hiilidioksidipäästöt otetaan huomioon, hiilidioksidin kokonaispäästöt olisivat kuitenkin vähentyneet vastaavalla määrällä eli 72 miljoonasta 63 miljoonaan tonniin.

Edellä olevien teoreettisten laskelmien perusteella puu saattaisi karrikoidusti ottaen joissain tapauksissa olla hiilitaseen kannalta edullisempaa kaataa, korjata ja jollain tavoin ”säilöä” kuin polttaa energiantuotannossa. Näin olisi tehtävä viimeistään juuri ennen kuin puu alkaa yli-ikäisyyttään lahota metsiin.

On siis taloudellisesti ja myös hiilitasapainon kannalta perusteltua kysyä, tulisiko puuta — sen ollessa nyt perinnäisessä mielessä vajaakäytössä — varastoida ja säilöä tulevaa käyttöä varten? Tuleva käyttö voisi, ja pitäisikin olla muutakin kuin energiakäyttöä niin kauan kuin muita, puuta edullisempia polttoaineita on saatavilla. Varastot voisivat olla joko pystyvuuna kasvukykyisissä metsissä tai ääritapauksessa jopa kaadettuina puuvarastoina. Näin tavallaan ostettaisiin fossiilisten polttoaineiden käyttöoikeutta nykyisiä tarpeita varten. Fossiilisten polttoaineiden käyttöön on hiilidioksidin ominaispäästöjen kannalta tehokkaampaa kuin puun käyttö polttoaineena. Toki puun polton teknologiaa ja muiden polttoaineiden yhteiskäyttöä puun kanssa on kehitetty viime aikoina ja kehitetään jatkosakin voimakkaasti. Sama koskee kuitenkin myös muita polttoaineita.

Puun energiakäyttöön liittyy hiilitaseen lisäksi myös muita kansantaloudellisia vaikutuksia, kuten työllisyys- ja aluetalousvaikutukset sekä heijastukset talouden ulkoiseen tasapainoon. Kuitenkin, silloin kun polttoainneiden verotusta kehitetään ympäristöverona ja nimen omaan hiilidioksidipäästöjen kannalta, tulisi hiilidioksidipäästöt ja muut näkökohdat käsitellä selkeästi erillisinä. Kumpiakaan ei kuitenkaan saisi unohtaa tarkasteltaessa kokonaistaloudellisia vaikutuksia.

4.2 Hiilidioksidivero ja metsäsektori

Mikäli hiilidioksidipäästöille olisi täsmällinen vero tai muu hinta, myös metsäsektorin merkitystä hiilitaseessa — hiilidioksidin sitojana ja luovuttajana — voisi taloudellisesti arvioida. Näin ei kuitenkaan Suomessa ainakaan toistaiseksi ole, vaikka periaatepäätös hiilidioksidiverosta onkin jo tehty. Jotta edes jonkinlaisia arvioita voisi tehdä, esimerkkiä pitää hakea muualta.

Norjalaiset (ks. Solberg ja Svensrud 1992) ovat koeluontoisesti laajentaneet Norjan metsätalouden kansantaloudellisia tilinpitolaskelmia puuntuotannon ulkopuolelle koskemaan myös vaikutuksia hiilitaseeseen ja muihin ympäristötaloudellisiin näkökohtiin. Norjassa kokeilu on ollut mahdollista, sillä siellä hiilidioksidiveron perusteet ovat verrattain selkeät.

Seuraavassa esitetään Norjan mallin mukainen kokeilu sovellettuna Suomen metsätalouteen vuodelle 1990. Laskelman lähtökohtana hiilitasevaikutusten arvottamisessa on kaksi oletusta. Ensiksi kuvitellaan, että Suomessa olisi vuonna 1990 ollut voimassa Norjan mallin mukainen hiilidioksidivero. Polttoöljyä verotettiin tuolloin 0,80 NOK (Norjan kruunua)/litra, mikä vastaa hiilidioksidiverona 250 NOK/hiilidioksiditonni. Vuoden 1990 valuuttakurssin mukaan se olisi merkinnyt Suomessa noin 175 markan veroa hiilidioksiditonnia kohti.

Toiseksi, käytetään periaatetta, jonka mukaan aiheutettu ympäristöhaitta (rajahaitta) on arvoltaan yhtä suuri kuin aiheutettu ympäristöhyöty (rajahyöty). Tämä merkitsee sitä, että kansantulolaskelmassa hyvitetään metsätaloutta hiilidioksidiveron suuruisella rahamäärällä (varjohinnalla) eli 175 markalla jokaista metsäekosysteemin sitomaa ilmakehän hiilidioksiditonnia kohti. Toisaalta metsätaloutta myös veloitetaan saman verran metsäekosysteemin puun käyttöön luovuttamasta hiilidioksiditonniasta. Taulukon 10 laskelmassa on pyritty ottamaan huomioon myös muiden ympäristötaloudellisten vaikutusten rahallinen arvo kansantulolaskelmaan. Luvut perustuvat pitkälti harkintaan ja parhaaseen saatavilla olevaan arvioon (best judgement) ja ne pyrkivätkin osoittamaan ainoastaan laskelman erien suuruusluokkia sekä niiden välisiä suhteita.

Jos ympäristö ja luonnonvarat pyritään ottamaan huomioon kansantulolaskelmissa, pitäisi niiden käytön eli virtasuureiden lisäksi niiden varantojen muutosten arvo ottaa huomioon (ks. esim. Hartwick 1990, Mäler 1991, Hultkrantz 1992). Varantojen muutosten arvo tulisi edelleen laskea nettomääräisten rajahintojen perusteella (esim. Mäler 1991). Koska luonnonvarojen käyttö ja muu kuluminen vastaavat kansantalouden tilinpidon

mukaisia reaali-pääoman poistoja, laskelmissa olisi sen vuoksi käytettävä mittaimena bruttokansantuotteen sijasta nettokansantuotetta.

Taulukon 10 laskelman kohdassa 1 (PUUN MYYNNIT) on vähentämällä kansantalouden tilinpidon mukaisista bruttokantorahatuloista (8,0 miljardia markkaa) puun kasvatuksen poistot (1,4 miljardia markkaa) saatu nettokantorahatulot (6,6 miljardia markkaa). Kun tästä edelleen vähennetään hyödykkeiden ja palvelusten ostot muilta sektoreilta (0,6 miljardia markkaa), saadaan metsien hakkuiden vaikutus nettokansantuotteen (6,0 miljardia markkaa).

Kohdassa 2 (PUUVARANTO) on kasvu- ja poistumatietojen avulla laskettu puuvarannon lisäys vuonna 1990, yhteensä 24,3 miljoonaa kuutiometriä. Tämä puuvarannon nettokasvu mahdollistaa hakkuiden ja kantorahatulojen lisäämisen tulevaisuudessa. Osa tästä puuston lisäyksestä sijaitsee kaukaisilla alueilla ja jää ilmeisesti taloudellisen käytön ulkopuolelle. Osalla puusta saattaa olla jopa negatiivinen kantohinta. Lisäksi metsätuotteiden tulevaa markkinakehitystä on hyvin vaikea tarkoin ennustaa. Niinpä puuvarannon lisäyksen eli nettokasvun arvoksi on arvioitu vain 1,2 miljardia markkaa. Puuvarannon lisäyksen arvo (rajahinta) on tällöin 50 markkaa kuutiometriä kohti, kun toteutunut yksikköhinta vuonna 1990 oli 109 markkaa/kuutiometri. Se on laskettu jakamalla metsien hakkuiden nettokansantuote-erän arvo (6,0 miljardia markkaa) kokonaispoistumalla (55,1 miljoonaa kuutiometriä). Rajahinta on tällöin 45 prosenttia toteutuneesta keskimääräisestä yksikköhinnasta.

Taulukko 10. Metsät ja puun sitoma hiili kansantalouden tilinpidossa.

Arvio puun, sen sitoman hiilidioksidin ja muiden metsätuotteiden nettoarvonlisäyksestä vuodelle 1990, kun hiilen arvon laskentaperusteena käytetään hypoteettista hiilidioksidiveroa.

1. PUUN MYYNNIT	
Bruttokantorahatulot	8 016 Mmk
– Puun kasvatuksen poistot	1 386 Mmk
– Hyödykkeet ja palvelut muilta sektoreilta	600 Mmk
= Nettokantorahatulot	6 030 Mmk
2. PUUVARANTO	
Kokonaiskasvu	79,4 Milj.m ³
– Kokonaispoistuma	55,1 Milj.m ³
= Puuvarannon lisäys	24,3 Milj.m ³
Nettokasvun arvo ("Valistunut arvaus"):	1 220 Mmk
3. MUUT TUOTTEET KUIN PUU	
(Marjat, sienet, jäkälät yms., riista, porotalous)	
Tuotteiden arvo ("Valistunut arvaus"):	950 Mmk
4. ILMAKEHÄN HIILEN SITOMINEN	
Puuvarannon lisäys: 24,3 milj.m ³ sitoo	
19,2 miljoonaa t. ilmakehän CO ₂ . Oletetun	
CO ₂ -veron (175 mk/t CO ₂) mukainen hyöty:	3 360 Mmk
5. NEGATIIVISET YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	
(Tehometsätalouden ympäristöhaitat)	
Maksuhalukkuusperiaatteen mukainen	
"valistunut arvaus":	- 340 Mmk
YHTEENSÄ	11 220 Mmk

Puuntuotannon lisäksi metsien muita käyttömuotoja ovat mm. metsämarjojen ja sienten poiminta, jäkälän keruu, turvetuotanto, metsästys ja porotalous sekä metsien käyttö virkistykseen ja suojelualueiksi. Näiden arvon määrittäminen luotettavasti on mahdotonta, koska esimerkiksi kaikkia käyttömuotoja ei voida mitata ja osasta käyttömuotoja on olemassa vain paikallisia selvityksiä.

Vuonna 1990 kauppaan tulleiden marjojen ja sienten poimintatulot olivat 57,5 miljoonaa markkaa, jäkälän vientitulot noin 12 miljoonaa markkaa ja metsästyksen arvo metsästysvuonna 1990/91 lähes 246 miljoonaa markkaa. Porotalouden lihantuotos oli noin 3,2 miljoonaa kiloa ja sen rahallinen arvo runsaat 100 miljoonaa markkaa. Polttoturvetta tuotettiin noin 6 miljoonaa tonnia ja kasvuturvetta 1,5 miljoonaa tonnia.

Metsä 2000 toimikunnan arvion (Talousneuvosto 1985, s. 26) mukaan ”kaikkien metsästä kerättyjen sivutuotteiden arvo oli 1980-luvun alussa yhteensä noin 700 miljoonaa markkaa eli vajaat 10 prosenttia vuosittain hakattavan puutavaran arvosta kaukokuljetusreitillä varrella”. Tähän ja tuotantomäärien kehitykseen perustuen on taulukon 10 laskelmassa arvioitu muiden tuotteiden kuin puun nettokansantuote-erän arvoksi 950 miljoonaa markkaa.

Puuvarannon lisäys, 24,3 miljoonaa kuutiometriä, vastaa 10,2 miljoonaa kuiva-ainetonna biomassaa. Se puolestaan sisältää hiiltä 5,2 miljoonaa tonnia, jonka sitoma ilmakehän hiilidioksidimäärä on 19,2 miljoonaa tonnia. Olettaen, että marginaalinen hiilidioksidin sitominen biomassaan on yhtä arvokasta kuin hiilidioksidin rajapäästöt, puuvarannon lisäyksen arvo hiilensitोजना on $175 \text{ mk} \times 19,2$ eli vajaat 3,4 miljardia markkaa. Laskelmaa voisi täsmentää määrittämällä puuvarannon kasvulle kiertoaika ja todennäköinen loppukäytön rakenne sekä laskemalla tämän nykyarvo jonkin yhteiskunnallisen diskonttokoron avulla (ks. esim. Hoen 1993). Tutkimuksen tässä vaiheessa täsmentämistä ei kuitenkaan katsottu tarpeelliseksi tehdä.

Viimeisenä eränä laskelmassa on arvioitu negatiiviset ympäristövaikutukset. Talousmetsien hoito ja hakkuut vaikuttavat mm. metsien monimuotoisuuteen, virkistykseen ja metsästykseseen. Ihmiset arvostavat usein eniten metsien säilyttämistä koskemattomana tai ns. monikäyttömetsänä. Suomessa ei ole kattavia tutkimuksia siitä, kuinka paljon ihmiset olisivat valmiit maksamaan, jotta metsiä käsiteltäisiin taloudellisesti vähemmän tehokkaasti, puhtaasti monikäyttötavoitteita noudattaen. Norjassa tämän tehokkaan metsätalouden ympäristöhaitan on laskettu olleen vuonna 1991 maksuhalukkuusperiaatteen mukaisesti 146 miljoonaa kruunua eli noin 100 miljoonaa Suomen markkaa. Kun otetaan Suomen suurempi metsäala ja väestö huomioon, arvioidaan tässä laskelmassa negatiivisiksi ympäristövaikutuksiksi 340 miljoonaa markkaa.

Tarkkaavainen lukija huomaa, että taulukossa 10 on kaksinkertaista laskentaa. Puuvarannon lisäystä ei nimittäin voi käyttää samanaikaisesti puunjalostukseen tai polttoon ja ilmakehän hiilen sitomiseen. Näin ollen jompikumpi käyttövaihtoehdoista on vähennettävä laskelmasta. Taloudellisesti on järkevää vähentää vähäarvoisempi käyttökohde eli tässä tapauksessa kohdan 2 ”Nettokasvun arvo” (1 220 Mmk). Tällöin on yhteenveto

puun ja muiden metsäntuotteiden nettoarvonlisäyksen arvioista vuonna 1990 seuraava:

Puun myynnit	6 030 Mmk	60,3 %
Muut tuotteet kuin puu	950 Mmk	9,5 %
Hiilen sitoutuminen puuvarojen lisäykseen	3 360 Mmk	33,6 %
Negatiiviset ympäristövaikutukset	-340 Mmk	-3,4 %
Nettoarvonlisäys yhteensä	10 000 Mmk	100,0 %

Ainut luotettava luku asetelmassa on puun myyntien arvo, joka perustuu huolellisesti laadittuun tilastoon. On kuitenkin mielenkiintoista, että puuvarojen nettolisäyksen arvo hiilidioksidin sitojana olisi mainituin laskentaperustein peräti 55 prosenttia puun myyntien nettoarvosta.

Suomalaisen metsäpolitiikan peruspilarina on ollut metsävarojen kestävä ja edistävän käytön periaate. On pyritty turvaamaan lisääntyvät puun käytön mahdollisuudet kestävästi niin, että saman aikaisesti turvataan myös tulevat hakkuumahdollisuudet. Kun puuston kasvu jo lähes kolmen vuosikymmenen ajan on ylittänyt metsien kokonaispoistuman — ja viime vuosien ajan jo lähes kolmanneksella — perinnäinen tavoite kestävien hakkuumahdollisuuksien lisäämisestä on saanut rinnalleen tavoitteen pyrkiä poistamaan tätä metsien vajaakäytöksi kutsuttua ongelmaa.

Perinnäisestä hakkuumahdollisuuksien vajaakäytöstä johtuva metsävarojen lisääntyminen ja niihin varastoitunut orgaaninen hiili antavat metsien vajaakäytön ongelmalle uuden näkökulman. Ongelman talousteorian mukainen ratkaisu on verrata keskenään mahdollisesta hiilidioksidiverosta johdettua ja puun perinnäisen käyttäjän (metsäteollisuuden) maksamaa kantohintaa (rajahintaa). Jos hiilidioksidiverosta johdettu hinta on korkeampi kuin teollisuuden maksama hinta, puuta tulisi kasvattaa ja kerätä hiilidioksidin varastoiksi. Edellä esitetyssä esimerkissä ns. Norjan mallin mukaisesta hiilidioksidiverosta (175 mk/CO₂ -tonni) johdettu keskimääräinen kantohinta hiilen varastoijana olisi 138 mk/m³. Kantorahatulojen ja hakkuukertymän perusteella laskettu bruttokantohinta vuonna 1990 oli 164 mk/m³ ja nettokantohinta vastaavasti 123 mk/m³.

Puun käyttöön ja hiilidioksidiveroon liittyy puun energiakäytön ohella myös kohdistamisongelma. Kenen hyödyt ja haitat viime kädessä ovat? Puun tuottajan, tuottajamaan puunjalostajan, kuluttajamaan jatkojalostajan vai lopputuotteen käyttäjän? Taulukon 10 laskelmassa puuntuottaja on periaatteessa maksanut korjaamastaan puusta aiheuttamansa hiilivaraston pienenemisen haitan hyödyllä, joka on tullut vastaavan suuruisena puuston kasvuna. Nettohyötyhän syntyy kasvun ja poistuman erotuksena.

Kohdentamisongelman mutkikkuuden valottamiseksi tarkastellaan vielä kerran puun kokonaiskäyttöä Suomessa vuonna 1990. Sehän oli karkeasti ottaen 60 miljoonaa kuutiometriä. Edellä esitetyn hypoteettisen hiilidioksidiveron (175 mk/hiilidioksiditonni) mukaisesti hiilen sitoutumisesta metsäekosysteemiin aiheutunut hyöty olisi ollut yhteensä noin 7,7 miljardia markkaa. Teollisuuden puuperäisten polttoaineiden (hake, puru, jäteliemet) sekä kiinteistöjen polttopuun käytön seurauksena tästä puumäärästä kuitenkin vapautui noin 40 prosenttia eli runsaat 17,5 miljoonaa tonnia hiilidioksidia lähes välittömästi takaisin ilmakehään. Raha-arvoltaan haitta olisi ollut noin 3,1 miljardia markkaa. Puunjalosteiden loppu-

käyttöön kotimaassa sitoutui 10 prosenttia puun kokonaiskäytöstä ja sen arvo hiilidioksidiveron mukaisesti olisi ollut 0,8 miljardia markkaa. Tämä osuus hiilidioksidista vapautuu hitaasti takaisin ilmakehään, joten sen hyöty hiilitaseen kannalta on pitkäaikainen, joskin suhteellisen pieni.

Lähes puolet eli vajaa kuusi miljoonaa tonnia puun kokonaiskäytön varastoimasta hiilestä ohjautui puunjalosteiden viennin myötä ulkomaille. Sen arvo potentiaalisen hiilidioksidiveron mukaisesti olisi ollut 3,8 miljardia markkaa. Jo vuoteen 1995 mennessä siitä lähes kolme neljäsosaa (arvoltaan 2,8 miljardia markkaa) olisi palautunut hiilidioksidina takaisin ilmakehään. On vielä huomattava, että noin kymmenen prosenttia eli orgaaniseksi hiileksi muutettuna lähes kuusi miljoonaa tonnia Suomessa vuonna 1990 käytetystä puusta oli tuontipuuta. Ilmakehästä sitoutuneena hiilidioksidimääränä se vastasi 4,8 miljoonaa tonnia ja oli hypoteettisen hiilidioksidiveron mukaan hinnoiteltuna arvoltaan 1,2 miljardia markkaa. Oikea ja täsmällinen kohdentaminen edellyttääkin huolella laadittua laskenta- ja seurantajärjestelmää.

4.3 Metsäsektori ja ilmastopimukset

Myös Suomi joutuu yhä aktiivisemmin ottamaan kantaa kansainvälisiin ilmastopimuksiin. On esitetty (esim. Manninen ja Marttila 1991), että Suomen ilmastopolitiikan tulisi olla samalla sekä aggressiivista että defensiivistä eli molempia joustavasti soveltavan strategian mukaista. Sen mukaisesti tulisi pyrkiä kansainväliseen sopimuskokonaisuuteen, jonka tavoitteet on asetettu tiukasti kaikkia sitoviksi, mutta joka on tavoitteiden saavuttamisessa eli keinojen suhteen joustava. Tämä mahdollistaisi kansallisessa päästöpolitiikassa ja hiilidioksidin nielujen hyväksikäytössä kustannustehokkuuden.

Rio de Janeirossa kesällä 1992 pidetyssä YK:n ympäristö- ja kehityskonferenssissa sovittiin Suomen metsäsektoria silmällä pitäen lähinnä kahdesta joustavuuteen tähtäävästä seikasta. Ensinnäkin päätettiin pyrkiä noudattamaan ns. nettoemissioperiaatetta. Nettoemissio on kansallinen nettopäästö, jossa otetaan huomioon hiilidioksidipäästön vastapainona hiilen sitoutuminen biomassaan, lähinnä metsien puustoon ja maaperään. Vieläkin tämä periaate tulkitaan Suomessa yleensä pelkistetysti sillä tavalla, että puuvarojen lisääntymisen vuoksi puuperäisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöjä ei oteta huomioon hiilidioksidin kokonaispäästöjä laskettaessa (ks. luku 2.3, s. 15). Yleisesti ottaen nettoemissioperiaatteen pelkistetty sääntö onkin, että biomassan polttoa ei lasketa päästöön. Tämä laskentaperiaate on kuitenkin epätasällinen ja saattaa johtaa harhaisiin päätelmiin.

Esimerkiksi vuonna 1990 nettoemissioperiaatteen mukaisesti lasketut hiilidioksidipäästöt olisivat olleet 3 miljoonaa tonnia pienemmät kuin pelkistetyn laskentaperiaatteen mukaiset päästöt. Hakkuiden vuosittaiset vaihtelut voivat kuitenkin herkästi vääristää pelkistetyn laskentatavan mukaisia päästöjä ja johtaa harhaan. Toisaalta pelkistetty laskentatapa saattaa helposti johtaa kustannustehottomuuteen, jos kokonaispäästöt

unohdetaan. Tehokkain keino on lähes poikkeuksetta hiilidioksidin bruttopäästöjen vähentäminen. Kaikki energiamuodot tulevat tällöin hiilitaseen kannalta tasapuolisesti käsitellyiksi. Luonnollisesti energiapolitiikalla on myös muita tavoitteita kuin hiilidioksidipäästöjen minimoiminen.

Toiseksi Rion kokouksessa tehtiin periaatepäätös ns. kuplajärjestelystä. Sen mukaan yksittäisten maiden sijasta voidaan käsitellä maaryhmiä kokonaisuuksina niin, että maaryhmälle on asetettu kokonaistavoite ja erilaisia toimia voidaan kohdistaa tiettyihin maihin pyrkimällä esimerkiksi kustannustehokkuuden kannalta parhaaseen ratkaisuun. EY on ajanut voimakkaasti kuplamallia. Suomen kannalta malli saattaa olla edullinen, mikäli Suomi itse on kuplan sisällä (ks. esim. Manninen ja Marttila 1991). Suomi voi siinä saada enemmän ymmärrystä erityispiirteilleen kuin globaaleissa neuvotteluissa. Toisaalta mahdollinen — ja Suomen kannalta edullinen — malli saattaisi olla ”kupla kuplan sisällä” -ratkaisu. Siinä esimerkiksi Pohjoismaat voisivat muodostaa oman pikkukuplansa EY:n sisällä.

Vuonna 1990 Pohjoismaiden (Suomi, Ruotsi ja Norja) yhteenlaskettu metsien puuston kasvu oli noin 57 miljoonaa kuutiometriä poistumaa suurempi. Se vastasi 45 miljoonan tonnin hiilidioksidinielua. Mikäli kaikissa Pohjoismaissa olisi vallinnut Norjan mallin kaltainen hiilidioksidivero, tämä puuston lisäys olisi merkinnyt lähes 11,3 miljardin markan (lähes 2,5 miljardia ECU:a) hiilitasevaikutusta. Tämä saattaisi jo olla neuvotteluvaltti pyrittäessä ottamaan huomioon Pohjoismaiden erityispiirteet sekä EY:n sisällä että maailmanlaajuisissa ilmastopoliittisissa neuvotteluissa.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä raportissa on esitetty puuainestilinpitoon perustuva puun käytön hiilitilinpito Suomessa vuodelle 1990. Puuainestilinpito ja puun käytön hiilitilinpito ovat luonnonvaraintilinpidon osia. Luonnonvaraintilinpito on kansantalouden tilinpidon laajennus ja tarkastelee kansantaloutta ja sen voimavarojen käyttöä ympäristotalouden näkökulmasta.

Suomen metsäekosysteemiin on sitoutunut yhteensä 2,8 miljardia tonnia orgaanista hiiltä. Puuston osuus tästä on 0,75 miljardia tonnia (26 prosenttia) ja runkopuun osuus 0,4 miljardia tonnia (15 prosenttia). Valtaosa eli 2 miljardia tonnia (73 prosenttia) on varastoitunut maaperään.

Vuonna 1990 hakkuissa metsistä poistuneen runkopuun sisältämä orgaanisen hiilen määrä oli 11,8 miljoonaa tonnia, mikä vastaa 43,3 miljoonaa hiilidioksiditonna. Kun puuston kasvun hiilisisältö oli vajaat 17,1 miljoonaa tonnia, niin puuvarojen lisäykseen vuonna 1990 varastoitui noin 5,2 miljoonaa tonnia hiiltä, mikä vastaa 19 miljoonaa hiilidioksiditonna. Runkopuuvarojen lisäys sitoi siten noin neljänneksen kaikista Suomen tunnetuista hiilidioksidipäästöistä. Korostettakoon, että tässä raportissa tutkittiin puun käyttöä, mikä rajoittaa tarkastelun ainoastaan runkopuuhun. Runkopuun osuus koko metsäekosysteemin sitomasta orgaanisesta hiilestä on vain 15 prosenttia. Koko metsäekosysteemin merkitys hiilen kiertokulussa on moninkertainen verrattuna puun käyttöön.

Vuodelle 1990 laaditun puunkäytön hiilitilinpidon lisäksi analysoitiin elinkaarianalyysin avulla hiilen sitoutumista ja vapautumista vuonna 1990 Suomessa valmistetuissa metsäteollisuustuotteissa sekä muussa kuin teollisessa puunkäytössä aina vuoteen 2040.

Metsätuotteiden käytön ja hajoamisen perusteella lasketut tuotteiden elinkaaret ovat usein suhteellisen pitkiä, puutuotteilla 50:stä jopa yli 150:een vuoteen. Kun tuotanto Suomen metsäteollisuudessa on kuitenkin keskittynyt massan ja paperin valmistukseen, jossa tuotteiden elinkaaren pituus on yleensä alle viisi vuotta, vapautuu metsäteollisuustuotteisiin varastoitunut orgaaninen hiili kokonaisuutena tarkastellen yllättävänkin nopeasti hiilidioksidina takaisin ilmakehään.

Kun lisäksi otetaan huomioon, että kaikesta talouskäyttöön tulevasta puusta peräti lähes 40 prosenttia ohjautuu viime kädessä polttoon, käyttöpuun elinkaari on keskimäärin lyhyt. Jo viiden vuoden kuluttua hakkuista on puuhun varastoituneesta orgaanisesta hiilestä noin kolme neljännestä palautunut hiilidioksidina takaisin ilmakehään.

Vaikka metsäteollisuus vastaa 85 prosentista puun kokonaiskäytöstä Suomessa ja vaikka viennin osuus metsäteollisuuden tuotannon arvosta on kolme neljäsosaa, niin siitä huolimatta vientituotteisiin sitoutuu vain vajaa puolet käytetyn puun biomassasta. Tämä johtuu siitä, että metsäteollisuuden käyttämästä puusta ohjautuu lopulta runsas kolmannes polttoon tuo-

tannossa tarvittavaksi energiaksi. Kaiken kaikkiaan käytetyn puun sisältämästä orgaanisesta hiilestä viime kädessä hiukan yli puolet vapautuu kotimaassa ja vajaa puolet ulkomailla, lähinnä EY:n alueella.

Mikäli hiilidioksidipäästöille olisi täsmällinen vero tai muu hinta, myös metsäsektorin merkitystä hiilidioksidin sitojana ja luovuttajana voisi taloudellisesti arvioida. Esitettyjen teoreettisten laskelmien valossa metsäsektorilla saattaisi olla Suomen ja Pohjoismaiden kannalta merkittävä rooli hiilen sitojana ja kasvihuoneilmaston voimistumisen rajoittajana neuvoteltaessa kansainvälisistä ilmastopimuksista. Puun energiakäytön voimakkaaseen lisäämiseen tulisi tutkimuksessa esitettyjen näkökohtien perusteella kuitenkin ainakin lyhyellä aikavälillä suhtautua varauksellisesti.

Tutkimuksessa esitetään ensimmäistä kertaa systemaattinen kuvaus puun käytön vaikutuksista hiilitaseeseen Suomessa. Vaikka puunkäytön tilastointi Suomessa on tasokasta, käytetty aineisto sisältää monia epävarmuustekijöitä ja suoranaisia puutteita. Tutkimusta onkin tarkoitus jatkaa tarkentamalla tilastomateriaalia ja kehittämällä laskentamenetelmiä. Esimerkiksi puun käyttökohteiden eli loppukäytön varannoista ja niiden puuaineksen orgaanisen hiilen sisällöstä (rakennukset, kaatopaikat jne) ei ole tietoa. Tässä raportissa tarkasteltiin vain hiilidioksidia. Jatkossa tullaan tutkimaan myös muiden kasvihuonekaasujen kiertokulkua puun käytössä.

Tutkimusta jatketaan seuraavaksi laatimalla hiilitilinpitoon perustuva laskentamalli, joka jäljittää puuhun sitoutuneen hiilidioksidin kiertoa orgaanisena hiilenä metsästä puun korjuun, kuljetuksen, jalostuksen, käytön ja lahoamisen kautta takaisin ilmakehän hiilidioksidiksi. Tämä HII-PUVA-malli (**HII**litase ja **PUU**VArojen käyttö) tulee olemaan simulointimalli, johon rakennetaan mahdollisimman paljon dynaamisia ominaisuuksia. Mallilla tullaan simuloimaan erilaisten puuvarojen kehitysvaihtoehtojen — esimerkiksi hakkuiden, puun korjuun ja käytön — vaikutuksia hiilen kiertoon maassa ja ilmakehässä. Puunkäytön hiilitilinpito on tämän mallin tietoaineistollinen perusta.

Lähdeluettelo

- Aalstad, T. 1990a. Forbruk av trevirke i Norge, hva går trevirket til og hvor lang levetid har produktene. Revidert utkast pr. 24.5.1990. 13s.
- Aalstad, T. 1990b. Nedbryting av organisk materiale i skog, med vekt på nedbryting og folgene av temperaturøkning på vekst og nedbryting. Notat pr. 15.07.90.
- Adger, N., Brown, K., Sheil, R. & Whitby, M. 1991. Dynamics of land use change and the carbon balance. Working paper 15. ESRC Countryside change initiative. 1991.
- Boström, S., Backman, R. & Hupa, M. 1990. Energiatuotannon ja kuluksen kasvihuonekaasujen päästöt Suomessa. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Sarja D:186.
- Detwiler, R.P. & Hall, C.A.S. 1988. Tropical forests and the global carbon cycle. *Science* 239, pp. 43–47.
- Energiatilastot 1990. Kauppa- ja teollisuusministeriö/energiaosasto. 1991.
- Hartwick, J.M. 1990. Natural Resources, National Accounting and Economic Depreciation. *J.Publ.Econ.* 43:291–304.
- Hoen, H.F. 1993. Forestry and National Accounting — A Comment. In: Lindal, M. & Naskali, A. (eds.) 1993. Valuing Biodiversity. *Scandinavian Forest Economics*, No 34. 1993. pp. 136–146.
- Hoen, H.F. & Solberg, B. 1991. Potential and efficiency of fixing CO₂ in forest biomass — principal issues and empirical investigation. 1991. Manuscript, 32p.
- Holopainen, E. 1993. Otsonimuutokset sidoksissa kasvihuoneilmioon. *Helsingin Sanomat* 20.6.1993, s.2.
- Hultkrantz L. 1992. National Account of Timber and Forest Environmental Resources in Sweden. *Env. and Res. Econ.* (2) 3: 283–306.
- Ilmastonmuutos — Tieteellinen arviointi. 1992. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ilmatieteen laitos. 1992.
- Ilmastonmuutos ja Suomi — kohti kansallista toimintastrategiaa. 1991. Suomen Akatemian julkaisu 4/91.
- Jantunen, M. & L. Nevanlinna: 1991. Kasvihuoneilmiö, ilmastonmuutos ja Suomi. *Teknillistieteelliset Akatemit* 1990:1.
- Karjalainen, T., Kellomäki, S., Lauhanen, R. & Tuovinen, T. 1991. Ilmaston muutoksen vaikutus metsäekosysteemiin ja metsänkäyttöön: Mekanismeja ja kehityssuuntia. *Silva Carelia* 19/1991.
- Karjalainen, T. & Kellomäki, S. 1992. Carbon storage in forest ecosystems in Finland. 1992. 13 p.
- Kauppi, P., Mielikäinen, K. & Kuusela, K. 1992. Biomass and Carbon Budget of European Forests, 1991 to 1990. *Science, Reprint Series* 3 April 1992, Volume 256, pp. 70–74.
- Kauppi, P.E. & Tomppo E. 1993. Impact of Forests on Net Emissions of Carbon Dioxide in West Europe. *Water, Air and Soil Pollution*. In Press.
- Komiteanmietintö 1991:21. Hiilidioksiditoimikunnan mietintö.
- Kulmala, A. 1992. Kasvihuoneilmiö. *Kansantaloudellinen aikakauskirja* 3/1992, s. 299–306.
- Luonnonvarainneuvosto 1990. Ilmastonmuutoksen vastatoimet pohjoisen havumetsävyöhykkeen metsissä. *Luonnonvarajulkaisu* 13.

- Luonnonvaraintilinpito. Puuainestilinpito. 1992. Tilastokeskus. Ympäristö 1992:3.
- Manninen, J. & Marttila, V. 1991. Kasvihuonekaasujen päästöjä ja nieluja koskevat neuvottelutavoitteet. Raportissa Ilmastonmuutos ja Suomi — kohti kansallista toimintastrategiaa. Suomen Akatemian julkaisuja 4/91. s. 12–21.
- Matthews, R. & D. Thompson 1989. Research and Information Note 160. British Forestry, Oct 1989.
- Mattila, V.-M. 1991. Hiilidioksidipäästöt, talous ja taloudellinen ohjaus. Valtion taloudellinen tutkimuskeskus, Keskustelualoitteita 9.
- Metsä 2000 -ohjelman tarkastustoimikunnan mietintö. 1192. Komiteanmietintö 1992:5.
- Metsätalastollinen vuosikirja 1990–1991. 1992. Folia Forestalia 790. Metsäntutkimuslaitos. 1992.
- Metsätalastotiedote 171/1992. Raakapuun käyttö Suomessa 1990. Metsäntutkimuslaitos. Metsien käytön tutkimusosasto. 1992.
- Mäler, K.G. 1991. National Account of Timber and Forest Environmental Resources. *Env. and Res. Econ.* “?”: 1–15.
- Pohjola, M. 1992. Ilmastonmuutos ja Suomi. *Kansantaloudellinen aikakauskirja* 3/1992, s. 297–298.
- Palo, M. & L. Petäjäistö 1991. Ympäristöbonus puun polttajille. Lämpölaitoksia syytä innostaa harvennuspuun käyttöön metsien ja metsurien parhaaksi. *Helsingin Sanomat* 24.8.1991, s. 2.
- Pohjonen, V. 1993. Lisää sahoja, sellua ja ydinvoimalan verran energiaa. *Metsälehti* N:2. 1993, s.10.
- Row, C. & Phelps, R.B. 1990. Tracing the Flow of Carbon Through U.S. Forest Product Sector. Presentation at the 19th World Congress, International Union of Forestry Research Organizations, Montreal, Canada, August 5–11, 1990. 13 p.
- Sampson, R.N. & Hair D. (eds.). 1992. *Forests and Global Change. Volume One: Opportunities for Increasing Forest Cover.* American Forestry Association, Washington DC.
- Schroeder, P.E. & Ladd L. 1991. Slowing the Increase of Atmospheric Carbon Dioxide: A Biological Approach. *Climatic Change* 19:283–290.
- Sedjo, R.A. 1990. The Global Carbon Cycle — Are forests the missing sink? *Journal of Forestry*, October 1990, pp. 33–34.
- Sedjo, R.A. 1992. Temperate Forest Ecosystems in the Global Carbon Cycle. *Ambio*, Volume 21, no 4, June 1992, pp. 274–277.
- Sedjo, R.A. & A.M. Solomon. 1989. Climate and Forests. In: Rosenberg, N.J., W.E. Easterling, III, O.R. Crosson & Darmstadter J. (eds.) *Proceedings of a Workshop*, Washington DC, June, 1988.
- Singh, K. D. 1993. The tropical forest resources assesment. *Unalysva*, Vol. 44, no 174, 1993/3, pp. 20–30.
- Solberg, B., Lunnan, A. & Rørstad, P.K. 1992. Skog og vegetasjon i den internasjonale klimaavtalen. Notat for Miljøverndepartementet. NLH. Institutt for økonomi og samfunnsfag. 1992.
- Suomen Metsäteollisuuden Keskusliitto. Vuosiülasto 1990.
- Talousneuvosto 1985. Metsä 2000 -ohjelman pääraportti. Metsä 2000 ohjelmajaosto.
- Turner, D.P., J.L. Jeffrey, G.J. Koerber & J.R. Parker (Eds.) 1993. *The Forest Sector Carbon Budget of the United States: Carbon Pools and Flux under Alternative Policy Options.* EPA/600/3–93/093.

LIITE 1.

Puuainestilinpidon metsätaseen (puutase) hiilisisältö 1990, 1000 tonnia hiiltä

	Yhteensä	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Varanto 1.1.1990	406 562	183 582	137 421	85 559
Vuosikasvu	16 559	7 642	5 223	3 694
Kokonaispoistuma	11 838	4 470	4 472	2 896
Luonnonpoistuma	274	134	74	66
Bruttohakuut	11 540	4 337	4 373	2 830
Metsäjättepuu	1 083	287	247	549
Nettohakkuu	10 457	4 050	4 126	2 281
Tukkipuu	4 425	1 938	2 103	384
Kuitupuu	5 246	1 998	1 916	1 332
Polttopuu	785	115	106	564
Varanto 31.12.1990	411 308	186 754	138 197	86 357

LIITE 3.

Puuainestilinpidon massataseen (massatili) hiilisisältö 1990, 1000 tonnia hiiltä.

	Saha- tukit	Kuitu- puu	Myyty polt- toaine	Jäämät	Pää- tuote	Käytetty polttoain	Sivutuot- -teet	Puujät- teet	Hävikki
Sahaus ja höyläys									
– sisään	3619	127	–	–	73	–	–	–	–
– ulos	4	18	497	1361	1572	108	–	184	65
Vanerin valmistus									
– sisään	525	–	–	–	6	–	16	–	–
– ulos	–	–	71	160	258	24	12	–	21
Lastulevyn valmistus									
– sisään	–	–	–	182	–	–	2	–	–
– ulos	–	–	2	–	146	2	8	–	27
Kuitulevyn valmistus									
– sisään	–	4	–	49	2	–	–	–	–
– ulos	–	–	–	–	44	–	2	2	6
Mekaanisen massa valmitus									
– sisään	189	1719	–	276	–	–	22	–	–
– ulos	–	–	–	78	1934	–	–	58	135
Kemiallisen massa valmistus									
– sisään	189	1719	–	276	–	–	22	–	–
– ulos	–	–	–	78	1934	–	–	58	135
Paperin ja kartongin valmistus									
– sisään	–	–	–	3247	131	–	–	–	–
– ulos	–	–	–	–	3370	–	–	21	-12

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 473

Myynti: METLA, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki.

Puh (90) 857 05 743. Fax (90) 625 308.

Hinta: 100 mk.

ISBN 951-40-1321-2

ISSN 0358-4283

GX-Paintec Oy, Helsinki 1993