

Jätepaperin polton ympäristövaikutukset systemiratkaisuna

Risto Palanterä

Energia-Ekono Oy



ISBN 951-38-4964-3

ISSN 1235-0605

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

VTT Kemianteeniikka, Ympäristöteeniikka, Betonimiehenkuja 5, PL 1403, 02044 VTT
Puh. vaihde (09) 4561, telekopio (09) 456 7022

VTT Kemiteeniik, Miljöteeniik, Betongblandargränden 5, PB 1403, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, telefax (09) 456 7022

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

Tekninen toimitus Leena Ukoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1996

Palanterä, Risto. Jätepaperin polton ympäristövaikutukset systeemiratkaisuna [System analysis of environmental impacts of the combustion of waste paper]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1769. 52 s.

UDK 676.038.2:662.62:504.064
Avainsanat waste papers, combustion, papers, wastes, environmental effects, environments, environmental protection, air pollution, energy production, tests, emission, system analysis

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin erilaisten kierrätettäväksi kelpaamattomien tai vaikeasti kierrätettävien jätepaperilaatujen polttomahdollisuudet ja polton päästöt. Vaihtoehtoisten jätepaperin käsittelytapojen - polton, kaatopaikkasijoituksen ja kuituraaka-ainekäytön - ympäristövaikutuksia tutkittiin systeemianalyysin avulla.

Keräyspaperin käyttöä energiantuotantoon suositellaan yleensä silloin, kun keräyspaperista on ylitarjontaa tai se ei laadullisesti kelpaa uusiomassan valmistukseen. Eräiden tutkimusten perusteella on myös ehdotettu, että kaikki keräyspaperi olisi hyödyllisintä käyttää polttoaineena.

Polttokokeiden jätepaperilaaduksi valittiin tiivispaperihylkyrullat, paalattu ruskea käärepaperi sekä tarrapaperin ja murskatun rakennusjätepuun seos. Kokeet ajettiin Mäntän Energia Oy:n kerrosleijupolttokattilalla. Paperin massavirta oli noin 3 t/h ja osuus polttoainetehosta keskimäärin 20 %. Ennen jokaista paperinpolttokoetta ajettiin nollakoe pelkällä turpeella.

Polttokokeiden perusteella vaikuttaa siltä, ettei turpeen korvaaminen paperilla energiantuotannossa vähennä poltossa syntyviä savukaasupäästöjä, mutta muuttaa jonkin verran niiden koostumusta. Tuloksia tarkasteltaessa on vaikea löytää sel-keää linjaa, jonka mukaan päästöt eri vaihtoehtoissa kehittyvät. Jokaisella paperilajilla oli jokin päästökomponentti, jonka suhteen se oli selvästi muita heikompi. Hiilimonoksidi-, typpioksiduuli- ja suolahappopäästöt olivat kaikissa paperinpolttokokeissa nollakoetta suuremmat. Ympäristön kannalta merkittävin ero oli turpeesta peräisin olevien hiilidioksidipäästöjen väheneminen, kun osa polttoaineesta korvataan paperilla.

Verrattaessa keräyspaperin energiahyötykäytön ympäristövaikutuksia kaatopaikkasijoittamiseen tärkein ero on kasvihuonekaasupäästöjen määrän pieneminen. Myös kaatopaikasta tulevan metaanin määrä vähenee. Muiden päästöjen erot, esimerkiksi SO₂- ja NO₂-päästöjen happamoitumisvaikutukset, olivat melko pienet. Kiinteän jätteen määrä on huomattavasti pienempi polttovaihtoehdossa. Keräyspaperin toinen hyödyntämismahdollisuus on käyttö paperi- ja kartonkituotteiden raaka-aineena. Vertailu polttoon osoitti, että raaka-ainekäytössä päästöt ilmakehään lisääntyvät, päästöt vesistöön pienenevät ja puunkulutus pienenee. Jos kasvihuonekaasujen paino ympäristövaikutusten arvioinnissa on merkittävä, tulosten valossa jätepaperin poltto on mielenkiintoinen mahdollisuus sekä kaatopaikkasijoituksen että uusiokäytön vaihtoehtona.

Palanterä, Risto. Jätepaperin polton ympäristövaikutukset systeemiratkaisuna [System analysis of environmental impacts of the combustion of waste paper]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1769. 52 s.

UDK 676.038.2:662.62:504.064
Avainsanat waste papers, combustion, papers, wastes, environmental effects, environments, environmental protection, air pollution, energy production, tests, emission, system analysis

ABSTRACT

Combustion alternatives of different waste paper grades that are unsuitable or difficult to recycle were studied. Environmental impacts of alternative methods of waste paper treatment - combustion, dump disposal and use for fibre raw material - were studied with the aid of system analysis.

Use of waste paper for energy production is usually recommended when there is oversupply of waste paper or it is unsuitable for recycled pulp. On the basis of certain studies it has also been suggested that it would be most profitable to use all waste paper as fuel.

Refused tight paper rolls, baled brown paper and a mixture of adhesive paper and crushed building waste wood were chosen for waste paper in the combustion tests. The tests were run in the fluidised-bed combustion boiler of Mäntän Energia Oy. The mass flow of paper was about 3 t/h and its proportion of the fuel efficiency on average 20 %. Prior to each paper combustion test, a blank trial was run with pure peat.

The combustion tests indicated that flue gas emissions are not reduced by using paper instead of peat for energy production, but their composition is changed slightly. It is difficult to find any clear trend of development in emissions. Each paper type had some emission component, in which it was clearly inferior to the other types. The carbon monoxide, nitrogen oxide and hydrochloric acid emissions were higher in all paper combustion experiments than in the blank test. With regard to the environment, the most significant difference was a reduction in peat-derived carbon dioxide emissions, when part of peat was replaced by paper.

When the environmental effects of the use of waste paper for energy were compared with those of landfill dumping, the most significant difference was a reduction in greenhouse gases. The amount of methane emitted from the landfill will reduce. Differences in other emissions, e.g., in acidification due to SO₂ and NO₂ emissions, were rather small. The amount of solid waste was significantly lower in the combustion alternative. Another alternative of utilising waste paper is to use it as the raw material of paper and board products. The comparison with combustion indicated that in the raw material use the emissions into the atmosphere will increase, while the effluents into watercourses and the wood consumption will be reduced. If the weighing of greenhouse gases in the assessment of environmental impacts is significant, the combustion of waste paper is of interest both as an alternative for landfill dumping and recycling.

ALKUSANAT

Jätepaperin polton ympäristövaikutukset -projekti kuului Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKES) SIHTI 2 -tutkimusohjelmaan. Lisäksi tutkimusta olivat rahoittamassa A. Ahlström Oy, Mäntän Energia Oy, Energia-Ekono Oy, Maa ja Vesi Oy, Jätekytyi Oy ja BMH Wood Technology Oy.

Projektin vastuunalaisena johtajana toimi Hannu Maskuniitty Procedo Oy:stä. Projektipäällikkönä toimi Risto K. Palanterä Energia-Ekono Oy:stä. Maa ja Vesi Oy:stä projektiin osallistuivat Fjalar Kommonen ja Marja Jallinoja. Polttokokeista vastasivat Seppo Tarkkanen (Mäntän Energia Oy), Kari Lammi (Energia-Ekono Oy) ja Risto Peltola (A. Ahlström Oy). Energia-Ekonon mittauksista vastasivat Mika Koivunen ja Janne Kerttula.

Tekijät kiittävät TEKESiä, muita rahoittajia ja kokeisiin osallistunutta laitoshenkilökuntaa arvokkaasta tuesta ja projektin mahdollistamisesta.

Helsinki toukokuu 1996

Risto Palanterä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	9
2 KERÄYSPAPERI	10
2.1 Yleistä	10
2.2 Keräyspaperin talteenotto ja käyttö	11
2.2.1 Suomen tilanne	11
2.2.2 Tilanne maailmanlaajuisesti	12
2.3 Keräyspaperin käyttö massa- ja paperiteollisuuden raaka-aineena	16
2.3.1 Yleistä	16
2.3.2 Kuinka monta kertaa kuituja voi kierrättää?	19
2.4 Keräyspaperin käyttö polttoaineena	20
2.4.1 Paperin poltto-ominaisuuksista	20
2.4.2 Polttotekniikka	21
2.5 Ympäristövaikutukset	22
2.5.1 Paperin kaatopaikkasijoituksen ympäristövaikutukset	22
2.5.2 Uusiomassan valmistuksen ja siistauksen ympäristövaikutukset	23
2.5.3 Keräyspaperin energiahyötykäytön ympäristövaikutukset	25
2.5.4 Ympäristövaikutusten vertailua	26
2.6 Kustannukset	24
2.6.1 Paperin kaatopaikkakäsittelyn kustannukset	28
2.6.2 Paperin kierrätyksen kustannukset	28
2.6.3 Keräyspaperin energiahyötykäytön kustannukset	29
2.6.4 Kustannusten vertailua	30
3 JÄTEPAPERIN POLTTOKOKEET	31
3.1 Yleistä	31
3.2 Mittausmenetelmät	31
3.3 Paperinpolttokokeiden tulokset	32
3.3.1 Laitoksen tila	32
3.3.2 Kaasumaiset päästöt	33
3.3.3 Polttoaineanalyysit	33
3.3.4 Lentotuhkan palamattomat	34
3.3.5 Hiukkasmittaukset	35
3.3.6 Muut mittaukset	36
3.3.7 Kattilahyötysuhde	37
4 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTARKASTELU	38
4.1 Savukaasupäästöjen vertailua	38
4.1.1 Yleistä	38
4.1.2 CO ₂	38

4.1.3	SO ₂	39
4.1.4	NO _x ja N ₂ O	39
4.1.5	CO	39
4.1.6	HCl	40
4.1.7	Hiukkaset	40
4.2	Ympäristövaikutusten vertailua	40
4.2.1	Keräyspaperin energiahyötykäyttö vs. kaatopaikkasijoittaminen	40
4.2.2	Neitseellinen kuitu vs. keräyskuitu	42
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	46
	KIRJALLISUUTTA	50

1 JOHDANTO

Jätepaperin polton ympäristövaikutukset -projektissa selvitettiin erilaisten kierrätettäväksi kelpaamattomien tai vaikeasti kierrätettävien jätepaperi-laatujen polttomahdollisuuksia ja polton päästöjä. Vaihtoehtoisten jätepaperin käsittelytapojen - polton, kaatopaikkasijoituksen ja kuituraaka-ainekäytön - ympäristövaikutuksia tutkittiin systeemianalyysin avulla.

Tutkimus aloitettiin paperijätteen polton ja polton ympäristövaikutusten kirjallisuusselvityksellä. Esiselvityksen perusteella valittiin polttokokeissa käytettävät jätepaperilaadut ja laadittiin yksityiskohtainen koeohjelma.

Polttokokeiden jätepaperilaaduksi valittiin Serlan tiivispaperihylkyrollat, paalattu ruskea käärepaperi sekä Raflatac-tarrapaperin ja murskatun rakennusjätepuun seos. Kokeet ajettiin marraskuussa 1994 Mäntän Energia Oy:n kerrosleijupolttokattilalla.

2 KERÄYSPAPERI

2.1 YLEISTÄ

Keräyspaperilla tarkoitetaan sellaista paperia ja pahvia, joka erillistoimin otetaan talteen hyötykäyttöä varten. Keräyspaperilla tarkoitetaan yleensä paperi- ja kartonkitekollisuuden raaka-aineeksi soveltuvaa keräyskuitumateriaalia. Jätepaperilla käsitetään yleensä sellaisia käytöstä poistettuja paperi- ja kartonkituotteita, jotka kulkeutuvat muun yhteiskuntajätteen mukana kaatopaikalle.

Keräyspaperimääriin ei tulisi sisällyttää paperin tuotantoprosessissa syntyvää hylkypaperia. Tämän jättäminen ulkopuolelle on usein kuitenkin vaikeaa, sillä käytännöt ilmoittaa keräyspaperimääriä vaihtelevat maittäin ja jopa yhtiöittäin. Toinen eri maiden välisten keräyspaperimäärien vertailua vaikeuttava tekijä on se, että tilastoissa annetaan usein vain keräyspaperin kokonaismäärä jakamatta sitä minkäänlaisiin laatuluokkiin. Lisäksi eri maiden laatuluokitukset vaihtelevat suuresti jo luokkien lukumäärän osalta, esimerkiksi Suomessa luokkia on 16 ja Englannissa peräti 68. FAO on kehittänyt laatuluokituksen, joka on todettu käytökelpoiseksi kansainvälisissä vertailuissa. Tässä luokituksessa keräyspaperi jaetaan neljään päälaatuluokkaan seuraavasti:

- I sanoma- ja aikakauslehdet
- II akkaukset ja ruskea jae
- III selluloosatuotteet ja korkealaatuinen painopaperi
- IV sekalainen jae.

Paperia kerätään maailmassa lähes 90 miljoonaa tonnia. Se käytetään pääasiassa paperin ja kartongin valmistukseen. Syyt keräyspaperin käyttöön eivät ole olleet niinkään ympäristönsuojelulliset vaan taloudelliset, sillä keräyspaperi on usein puumassaa edullisempi raaka-aine. Viime aikoina myös muut syyt ovat nousseet esille, kuten kaatopaikkakuormituksen vähentäminen, lainsäädäntö ja markkinoiden kysyntä. Tietysti myös siistaustekniikan kehittymisellä on vaikutusta. Tullevaisuudessa paperia mahdollisesti kerätään enemmän kuin paperi- ja kartonkitekollisuus pystyy käyttämään, sillä kuitujen tietyt laatuominaisuudet saattavat heiketä, kun niitä kierrätetään useita kertoja. Tämä on ongelma nimenomaan paperin nettotuojamaissa. Ylijäävä paperi voidaan käyttää hyödyksi muilla tavoilla. Vaihtoehtoista ehkä eniten kannatusta on saanut energian tuottaminen paperia polttamalla. Muita ehdotettuja tapoja keräyspaperin hyödyntämiseksi on esimerkiksi sen käyttö rakennusten eristemateriaalina.

Keräysaste ja käyttöaste ovat kaksi tekijää, joita usein käytetään, kun vertaillaan keräyspaperin käyttöä ja talteenottoa eri maissa. Keräysaste on keräyskuidun määrän suhde paperin- ja kartonginkulutukseen. Käyttöaste taas on keräyskuidun kulutuksen suhde paperin- ja kartongintuotantoon.

2.2 KERÄYSPAPERIN TALTEENOTTO JA KÄYTTÖ

2.2.1 Suomen tilanne

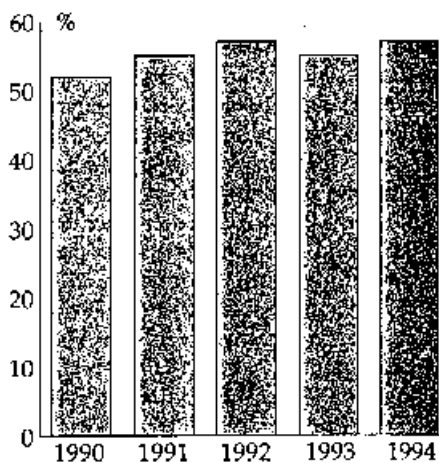
Suomessa otetaan talteen noin puolet kaikesta keräyskelpoisesta paperista eli noin 472 000 t. Se merkitsee noin 93 kg asukasta kohti. Talteenotettu keräyspaperimäärä vastaa noin 1,2 milj. m³ puuta eli 4 % vuotuisesta teollisuuden puunkäytöstä, mikäli keräyspaperin lasketaan korvaavan pääasiassa mekaanisen massan käyttöä.

Kun otetaan huomioon, että Suomi on suhteellisen harvaan asuttu maa, keräyspaperia otetaan talteen verrattain hyvin. Vuonna 1994 talteenottoaste oli 57 % kaikesta keräyskelpoisesta paperista ja 43 % paperin ja kartongin kokonaiskulutuksesta. Keräysaste laski hieman vuodesta 1992. Talteenottoasteen kehitys vuosina 1990 - 94 esitetään kuvassa 1. Suomalaisen keräyspaperin laatua pidetään korkeatasoisena, mikä perustuu siihen, että paperinvalmistuksessa keräyskuidun osuus raaka-aineesta on vähäinen, yleensä alle 5 %.

Kotikeräyspaperin koostumus on keskimäärin seuraava:

Sanomalehdet	65 - 70 %
Aikakauslehdet	noin 20 %
Mainosjulkaisut ja muut paperit	10 - 20 %.

Kotikeräyspaperin talteenotto lääneittäin esitetään kuvassa 2. Siitä nähdään, että tiheimmin asutulla Uudellamaalla kerätään talteen jo noin 70 % paperista. Tämä vastaa noin 40 % kaikesta Suomen kodeissa talteenotetusta keräyspaperista. Huonoin keräysaste on harvaan asutuilla alueilla, kuten Lapin, Vaasan ja Oulun lääneissä. Näillä alueilla kuljetusmatkat ovat luonnollisesti pitkiä ja sen vuoksi paperinkeräys taloudellisesti kannattamattomampaa.



Kuva 1. Keräyskelpoisen paperin ja kartongin talteenotto [%].

Kaipolan siivoustaloksen valmistuttua kyetään teoriassa kaikki tällä hetkellä kotimaasta saatava keräyspaperi käyttämään uudelleen. Puutetta on ollut ns. keskiryhmän laaduista, kuten ruskeasta pahvista ja kartongista sekä ns. hiokkeettomista papereista, jotka eivät sisällä mekaanista massaa. Kotimaassa kysytyjä lajeja ovat olleet myös parhaimpien laatuluokkien valkoiset painamattomat paperit ja kartongit. Vajaukset on täytetty tuonnilla. Vuonna 1994 Paperinkeräys Oy toi Suomeen 109 000 tonnia keräyspaperia.

Kerätyn paperin määrä jakautuu niin, että noin puolet saadaan kotitalouksista. Neljäsosa tulee teollisuudesta ja on enimmäkseen painolaitoksista jätteenä joutuvaa paperia. Kaupan osuus on 20 %. Parhaimmat tehostamismahdollisuudet ovat toimistoissa ja virastoissa, joiden nykyiset osuudet keräysmäärästä ovat pieniä, yhteensä noin 5 %. Taulukossa 1 esitetään keräyspaperin käyttäjät Suomessa vuonna 1992 ja kuvassa 3 niiden sekä Paperinkeräys Oy:n laitosten ja konserni-yhtiöiden sijainnit.

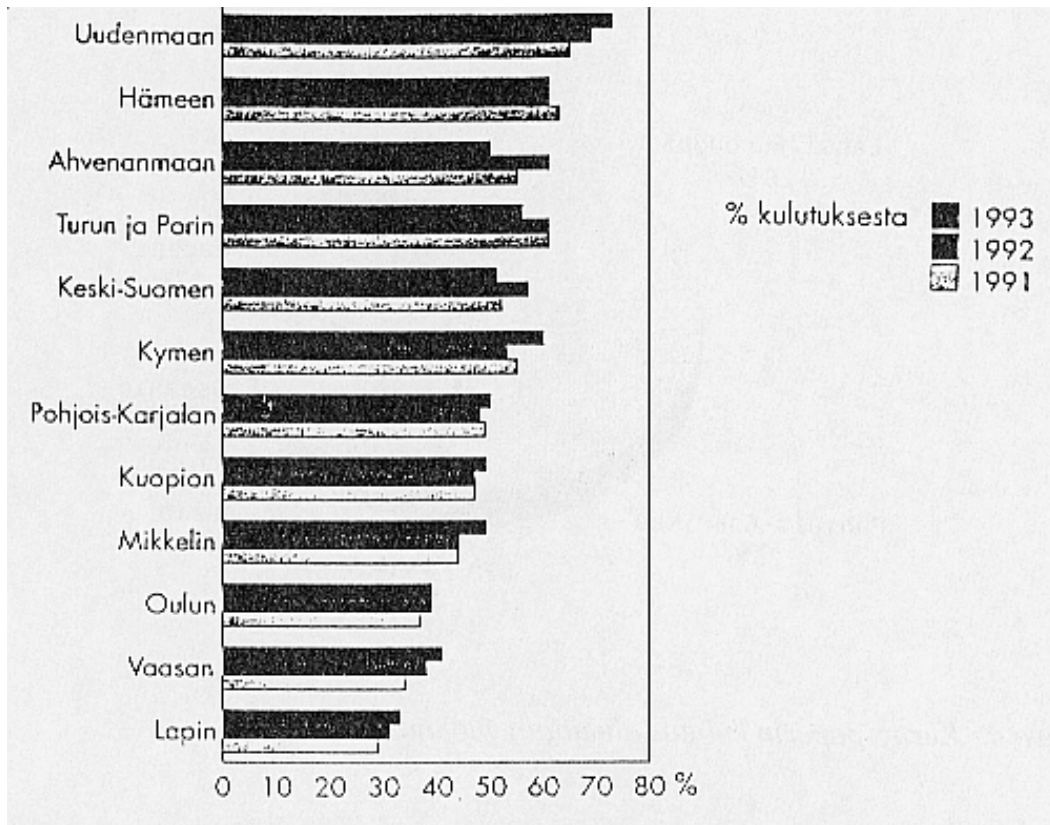
Taulukko 1. Keräyspaperin käyttäjät vuonna 1994.

Keräyspaperin käyttäjä	Käyttö	
	t	%
Yhtyneet Paperitehtaat Oy	130 200	23
Corenso United Oy Ltd	113 220	20
Metsä-Serla Oy	79 520	14
Keräyskuitu Oy	73 590	13
Pankakoski Boards Oy Ltd	45 290	8
Nokian Paperi Oy	45 290	8
A. Ahlström Osakeyhtiö	67 930	12
Muut	11 320	2
Yhteensä	566 100	100

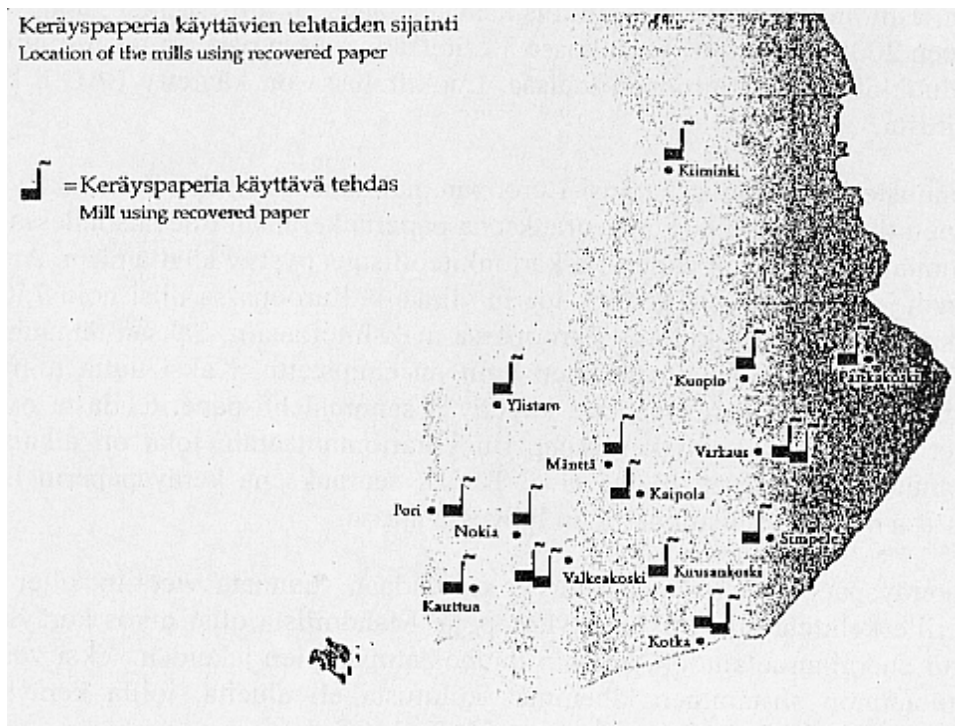
2.2.2 Tilanne maailmanlaajuisesti

Paperia kerättiin maailmassa vuonna 1991 noin 90,5 milj. tonnia, joka on noin 38 % kaikesta tuotetusta paperista. Ahkerimpia paperinkerääjämaita ovat tällä hetkellä Alankomaat, Itävalta ja Japani. Melko matala paperinkeräysaste on Italiassa, Kreikassa ja Irlannissa, mutta toisaalta näissä kaikissa maissa käyttöaste on varsin korkea. Noin 12 - 13 milj. tonnia, eli 14 % maailman keräyspaperin kulutuksesta suuntautuu vientiin. Tästä Yhdysvaltojen osuus on noin puolet ja tärkein kohdealue on Aasia. Keräyspaperin vienti Länsi-Euroopan maiden välillä edustaa noin kolmasosaa koko kansainvälisestä kaupasta. Keräyspaperin käytön jakautuminen alueittain maailmassa esitetään kuvassa 4. Länsi-Euroopan maiden, Japanin, Yhdysvaltojen ja Kanadan paperin ja kartongin tuotantomäärät, kerätyn paperin määrä ja kulutus, keräyspaperin tuonti ja vienti sekä keräys- ja käyttöasteet vuonna 1992 esitetään taulukossa 2.

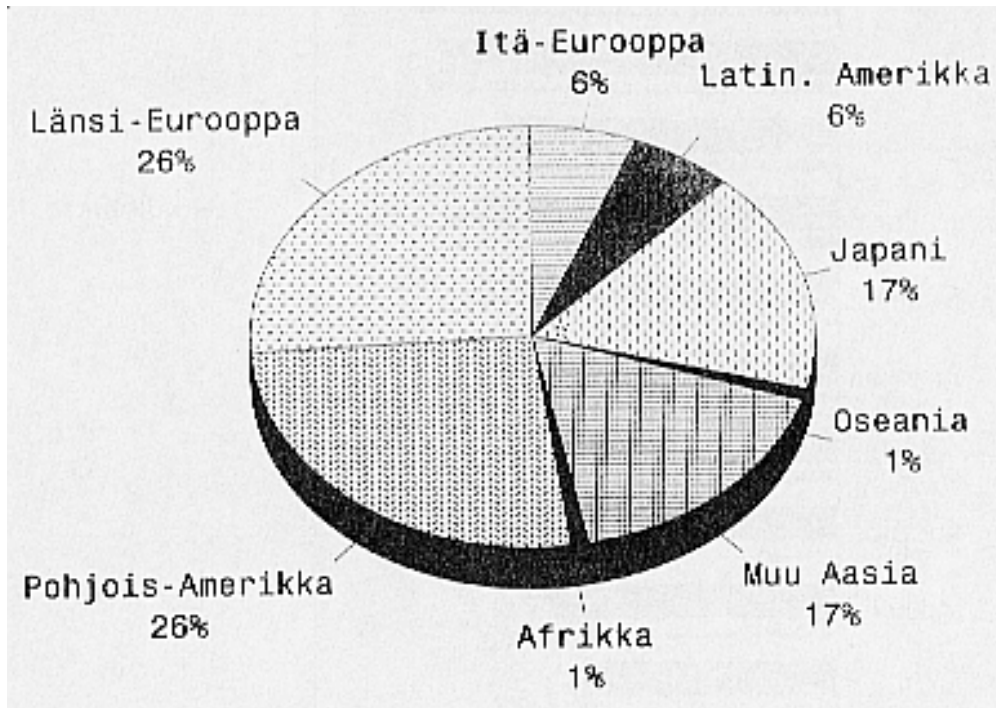
Tulevaisuudessa keräyspaperin kysyntä kasvaa, mutta myös keräysaste nousee, mahdollisesti jopa niin, että keräyspaperista tulee ylitarjontaa, varsinkin alemmista



Kuva 2. Kotikeräyspaperin talteenotto lääneittäin.



Kuva 3. Paperinkeräys Oy:n laitosten ja konserniyhtiöiden sekä keräyspaperia käyttävien tehtaiden sijainnit.



Kuva 4. Keräyspaperin kulutus alueittain vuonna 1990.

keräyspaperilaaduista. Jos oletetaan, että paperinkulutuksen vuosittainen kasvu on 2,5 %, nousee paperin kulutus vuoden 1991 241 milj. tonnista 348 milj. tonniin vuoteen 2005 mennessä, samalla kun paperin käyttöaste nousee 35,6 %:sta 45,7 %:iin. Tällöin keräyspaperin kulutus kasvaisi lähes 70 milj. tonnia vuodesta 1991 vuoteen 2005 mennessä. Taulukossa 3 esitetään kerätyn paperin jakautuminen eri laatuluokkiin Länsi-Euroopan maissa. Luokittelussa on käytetty FAO:n kuitujen luokitusta.

On ennustettu, että eräissä Länsi-Euroopan maissa, esimerkiksi Saksassa, voimaan tulevien tiukkojen säästöjen seurauksena paperia kerätään tulevaisuudessa talteen enemmän kuin maiden paperi- ja kartonkiteollisuus pystyy käyttämään. Arvioiden mukaan jo vuonna 1995 keräyspaperin ylijäämä Euroopassa olisi noin 750 000 t, vaikka keräyspaperin kulutus Euroopassa maksimoitaisiin. Saksan tämänhetkinen tilanne on kuitenkin päinvastainen kuin on ennustettu. Kaksi uutta toimintansa aloittanutta suurta keräyspaperia käyttävää sanomalehti-paperitehdasta ovat pysyneet käyttämään koko keräyspaperin ylitarjontamäärän, joka on aikaisemmin painanut keräyspaperin hintaa alas. Tämän seurauksena keräyspaperin hinta on Saksassa moninkertaistunut hyvin lyhyessä ajassa. Jos keräyspaperin ylijäämää syntyy, se voidaan suunnata vientiin, ellei keräyspaperille kehitetä uusia hyötykäyttötapoja. Mahdollista olisi myös keräyspaperin käyttö energiantuotantoon, ainakin huonolaatuisimpien jakeiden. Yksi vaihtoehto on tuotannon siirtäminen lähemmäs kulutusta eli alueita, joilla keräyspaperia syntyy, juuri niin kuin Saksassa on tapahtunut.

Taulukko 2. Paperin ja kartongin tuotanto, kulutus ja keräys eri maissa vuonna 1992.

Maa	Pap. ja kart. tuotanto 1 000 t	Pap. ja kart. kulutus 1 000 t	Talteenotto 1 000 t	Talteenottoaste %	Käyttö- raaka- aineena 1 000 t	Käyttö- aste %
Australia	2 072	2 755	1 015	37	948	46
Belgia	1 138	2 239	747	33	286	25
Brasilia	4 915	3 962	1 471	37	1 499	30
Espanja	3 448	4 582	1 777	37	2 274	66
E-Afrikka	1 814	1 554	598	33	600	33
E-Korea	5 504	5 383	2 325	45	3 829	70
Hollanti	2 835	3 160	1 728	55	1 998	70
Iso-Britannia	5 128	9 568	3 246	34	3 086	60
Italia	5 961	7 631	2 148	28	2 870	48
Itävalta	3 252	1 368	760	56	1 272	39
Japani	28 322	28 318	14 466	51	14 924	53
Kanada	16 594	5 317	1 880	34	2 900	17
Kiina	17 251	19 464	4 677	24	5 457	32
Meksiko	2 825	3 519	1 240	37	2 288	81
Norja	1 684	684	241	37	180	11
Portugali	954	856	335	39	362	38
Ranska	7 697	9 092	3 117	34	3 527	46
Ruotsi	8 378	1 742	865	50	1 198	14
Saksa	12 930	15 646	7 912	50	6 742	52
Suomi	9 147	1 245	440	43	532	6
Sveitsi	1 305	1 388	745	54	660	51
Taiwan	3 977	4 178	2 301	60	3 906	98
Tanska	326	1 084	408	38	315	97
USA	74 729	78 757	30 479	39	24 766	33
U.Seelanti	732	549	152	22	114	16

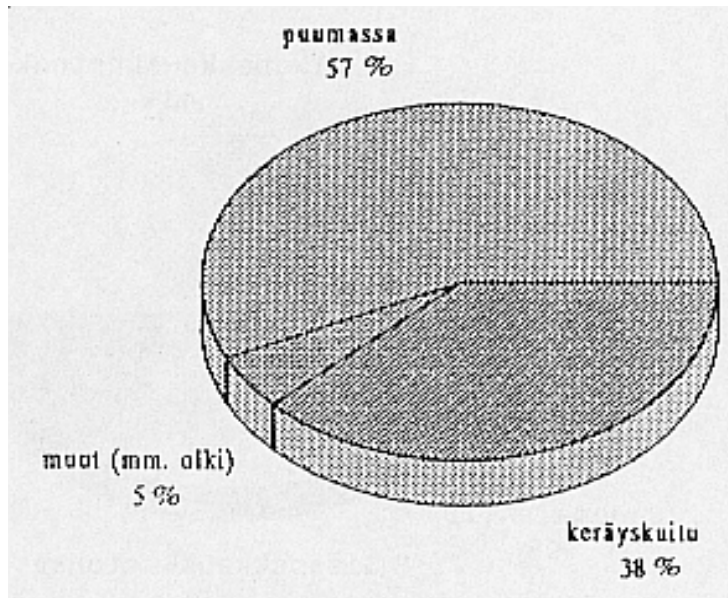
Taulukko 3. Keräyspaperin määrä FAO:n laatuluokittain Länsi-Euroopan maissa vuonna 1990.

Valtio / Alue	Luokka				Yhteensä
	I Sanoma- lehtipap.	II Ruskea jae	III Toimisto- pap.	IV Seka- lainen	
Ranska	569	1 763	402	306	3 040
Benelux-maat	151	311	15	206	683
Alankomaat	441	404	289	463	1 597
Saksa	1 480	2 207	730	1 952	6 369
Italia	303	842	353	351	1 849
Iso-Britannia	683	1 305	356	748	3 092
Irlanti	10	36	4	15	65
Tanska	1 531	117	79	82	409
Portugali	40	153	27	85	305
Espanja	281	1 011	380	18	1 690
Kreikka	9	73	16	21	119
EU yhteensä	4 098	8 222	2 651	4 247	19 218
Norja	56	62	9	55	182
Ruotsi	429	288	87	106	910
Suomi	255	91	69	40	455
Pohjoismaat yhteensä	740	441	165	201	1 547
Itävalta	219	131	2	313	665
Sveitsi	290	308	56	63	717
Muut yhteensä	509	439	58	376	1 382
L-Eurooppa yhteensä	5 347	9 102	2 847	4 824	22 147

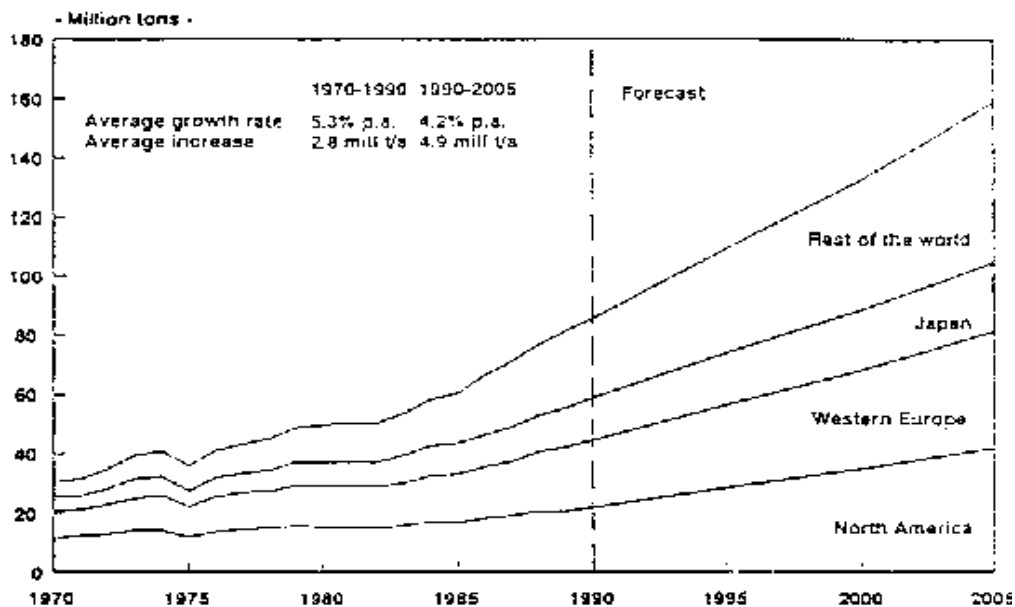
2.3 KERÄYSPAPERIN KÄYTTÖ MASSA- JA PAPERITEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA

2.3.1 Yleistä

Hyötykäyttöön kerätyn paperin osuus puunjalostusteollisuuden raaka-aineena on maailmassa jatkuvasti lisääntynyt, mihin on vaikuttanut ensisijaisesti se, että keräyskuitu on ollut huomattavasti halvempaa kuin puusta valmistettu kuitu. Vuonna 1991 maailmassa tuotettiin 241 milj. tonnia paperia, jonka raaka-aineista 38 % oli keräyspaperia. Jakauma esitetään kuvassa 5. Keräyskuidun kysyntä paperi- ja kartonkiteollisuudessa kasvaa tulevaisuudessa. Kysynnän kehitys vuodesta 1970 vuoteen 2000 esitetään kuvassa 6. Yli puolet kaikesta keräyspaperista käytetään Länsi-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, joissa luonnollisesti myös tuotetaan suurin osa kaikesta maailman paperista.

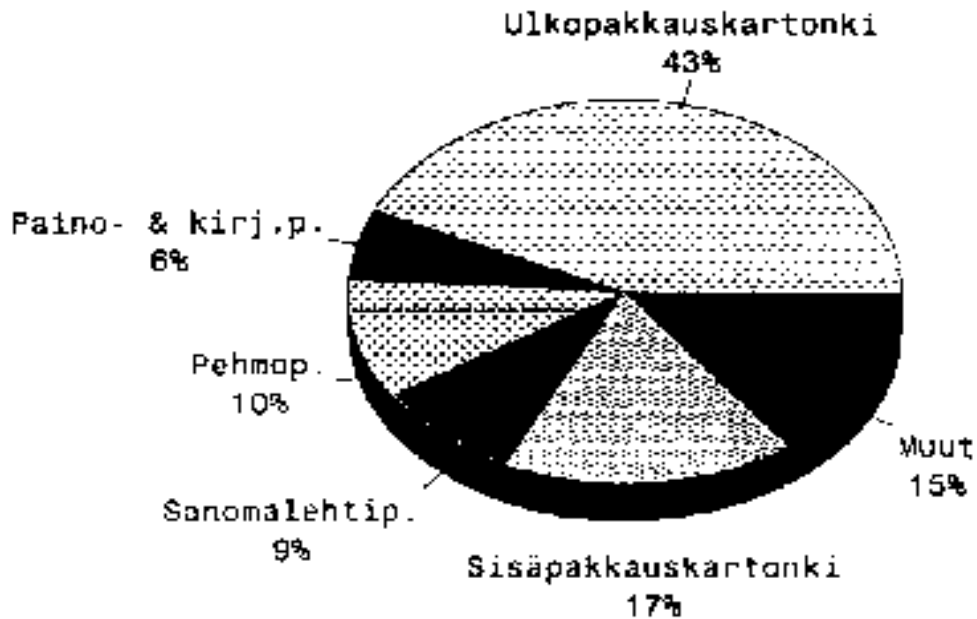


Kuva 5. Kuituraaka-aineen jakautuminen maailmassa.

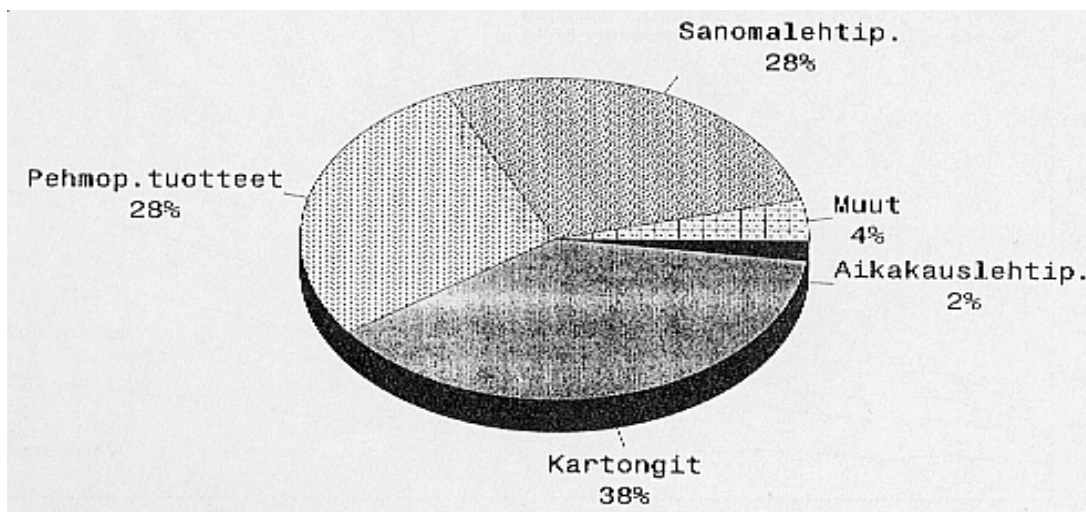


Kuva 6. Keräyskuidun kysyntä paperin ja kartongin tuotannossa.

Keräyskuitua voidaan käyttää useimpien paperilajien valmistukseen, poikkeuksena vain kaikkein korkealaatuisimmat tuotteet. Suurin osa keräyspaperista (yli 77 %) käytetään sellaisenaan, vain mekaanisesti puhdistettuna, pakkausmateriaalien valmistamiseen. Osa keräyspaperista käytetään korkeampien paperilaatujen valmistamiseen siistattuna massana, eli siitä poistetaan kemiallisin menetelmin painoväri mahdollisimman tarkkaan. Keräyspaperin käytön jakautuminen eri paperi- ja kartonkilajien kesken koko maailmassa vuonna 1990 esitetään kuvassa 7. Vastaava jakauma Suomessa vuodelta 1993 esitetään kuvassa 8.



Kuva 7. Keräyspaperin käytön jakautuminen paperi- ja kartonkilajeittain maailmassa vuonna 1990.



Kuva 8. Keräyspaperin käyttö raaka-aineena Suomessa vuonna 1994.

Siistaus on edellytyksenä keräyskuidun käytölle sanomalehti- ja painopapereissa. Koska siistatun kuidun paperitekniset ominaisuudet ovat lähellä mekaanisten massojen ominaisuuksia, sillä korvataan lähinnä mekaanista massaa paperinvalmistuksessa. Perinteisiä käyttökohteita ovat olleet sanomalehtipaperin ja pehmo-paperin valmistus. Sanomalehtipaperin valmistuksessa käytetty keräyskuidun määrä on yleensä 50 - 60 %, mutta jopa 100 %:n keräyskuitupitoisuus on mahdollinen. Pehmopaperit (WC-paperi, keittiörulla) voidaan valmistaa 100-prosenttisestä keräyspaperista.

Keräyskuitua voidaan teknisesti käyttää myös esimerkiksi päällystetyn (LWC-paperin) ja päällystämättömän (SC-paperin) mekaanisen paperin sekä päällystetyn ja päällystämättömän hiokkeettoman paperin valmistukseen, jolloin sen pitoisuus on 10 - 30 %. Toistaiseksi käyttö on kuitenkin ollut vähäistä, mutta tällä hetkellä on jo useita laitoksia joko suunnitteilla tai rakenteilla.

Maailmassa siistitään nykyisin noin 12 milj. tonnia keräyspaperia ja määrän arvioidaan kasvavan huomattavasti tulevaisuudessa. Suomessa toimii tällä hetkellä neljä siistaamaa, joiden yhteiskapasiteetti on 250 000 tonnia massaa vuodessa.

Taulukossa 4 esitetään keräyspaperin käyttö eri paperi- ja kartonkilaatujen valmistuksessa Länsi-Euroopassa. Taulukosta nähdään, että sekä kokonaismäärällisesti että suhteellisesti eniten keräyspaperia käytetään aaltopahvin raaka-aineiden eli linerin ja flutingin valmistuksessa. Vähiten keräyspaperia käytetään sen sijaan paino- ja kirjoituspaperien valmistuksessa. Erityisesti hiokkeettoman paino- ja kirjoituspaperin valmistuksessa suurin keräyspaperin käyttöä voidaan vielä paljon lisätä.

Taulukko 4. Keräyspaperin käyttö paperi- ja kartonkilajeittain Länsi-Euroopassa vuonna 1990.

Tuote	Tuotanto [1 000 tonnia]	Keräyspaperin kulutus [1 000 tonnia]	Käyttöaste [%]
Sanomalehti	8 336	2 664	32,0
Paino- ja kirjoituspaperi	22 468	965	4,3
- hiokkeeton	11 787	918	7,8
- hiokepit.	10 681	47	0,4
Pehmopaperi	3 491	1 829	52,4
Liner & Fluting	12 908	10 299	79,2
Kartonki	7 934	4 684	59,0
Muut	6 461	2 631	40,7
Yhteensä	61 598	23 002	37,3

2.3.2 Kuinka monta kertaa kuituja voi kierrättää?

Usein epäillään, ettei paperia voida kierrättää useita kertoja. Luonnollisesti kuidut pilkkoutuvat yhä lyhyemmiksi jokaisella kierrätyskerralla, mutta aina mukaan tulee myös uutta tai vain kerran kierrätettyä kuitua. Kuitujen kierrätettävyyttä riippuu käytetystä jätteenpaperin laadusta, käsittelytekniikasta ja erityisesti lopputuotteelle asetetuista laatuvaatimuksista. Teoriassa, jos uutta kuitua ei lisätä, kuidut tulevat lopulta niin lyhyiksi, ettei enää synny riittävästi kuidut toisiinsa liittäviä sidoksia. Saksassa tehdyissä tutkimuksissa on paperia onnistuttu kierrättämään jopa 16 kertaa ja kuiduista on aina saatu syntymään paperia, joten käytännössä tuskin koskaan tulee vastaan sellaista tilannetta, että paperikuitu olisi liikaa kierrätettyä. Toisten arvioiden mukaan taas on todettu, ettei paperi saisi

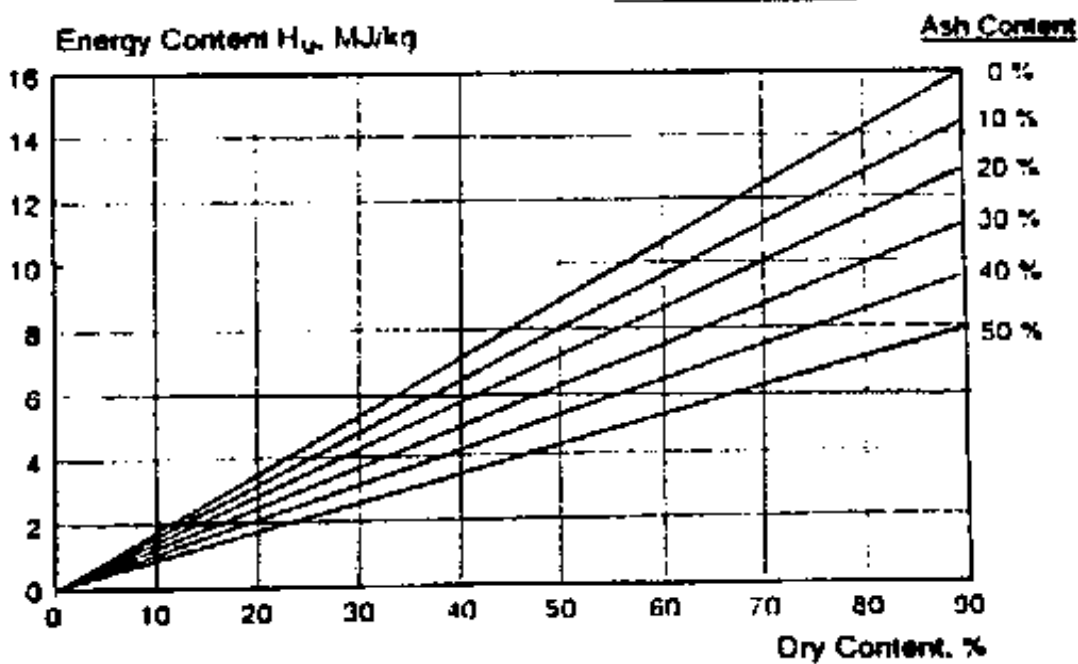
sisältää enempää kuin 5 % yli kaksi kertaa kierrätettyä kuitua, muuten paperin laatuominaisuudet kärsivät. Asiassa ei toisin sanoen ole vielä päästy yhteisymmärrykseen, vaan tutkimukset jatkuvat edelleen.

2.4 KERÄYSPAPERIN KÄYTTÖ POLTTOAINEENA

Keräyspaperin käyttöä energiantuotantoon suositellaan yleensä silloin, kun keräyspaperista on ylitarjontaa tai se ei laadullisesti kelpaa uusiomassan valmistukseen. Eräiden tutkimusten perusteella on myös ehdotettu, että kaikki keräyspaperi olisi hyödyllisintä käyttää polttoaineena.

2.4.1 Paperin poltto-ominaisuuksista

Paperin kosteus ja tuhkapitoisuus vaikuttavat sen lämpöarvoon kuvan 9 mukaisesti. Paperin lämpöarvo vaihtelee myös suuresti paperilajeittain, kuten nähdään taulukosta 5. Suurin lämpöarvo on vahatulla kartongilla ja pienin hieno- ja aikakauslehtipapereilla. Tämä johtuu toisaalta vahatun kartongin sisältämisestä öljypohjaisista aineista ja toisaalta siitä, että hieno- ja aikakauslehtipaperit sisältävät runsaasti täyte- ja päällysteaineita, jotka nostavat paperien tuhkapitoisuuden korkeaksi. Suurin osa keräyspaperista koostuu sanomalehtipaperista, jonka lämpöarvoa 18,5 MJ/kg käytetään usein energialaskelmien perustana. Tämän paperilajin lämpöarvo on siis noin 2/3 kivihiilen lämpöarvosta ja sen tuhkapitoisuus on selvästi alempi kuin kivihiilen (taulukko 5).



Kuva 9. Paperin energiasisällön riippuvuus tuhka- ja kosteuspitoisuudesta.

Taulukko 5. Paperi- ja kartonkituotteiden sekä kivihiilen, öljyn ja puun palamisteknisiä ominaisuuksia.

Aine	Lämpöarvo käyttökosteudessa, MJ/kg	Kuiva-aineen lämpöarvo MJ/kg	Kosteus paino-%	Haihtuvat kuiva-aineesta paino-%	Tuhka kuiva-aineesta paino-%
Sanoma-lehtipaperi	18,5	19,7	6,0	86,3	1,5
Käärepaperi	16,9	17,9	5,8	89,1	1,1
Aikakauslehtipaperi	12,2	12,7	4,1	69,2	23,4
Aaltopahvilaatikot	16,4	17,3	5,2	81,7	5,3
Muovipintainen paperi	17,1	17,9	4,7	88,4	2,8
Vahattu kartonki	26,3	27,2	3,5	94,2	1,2
Elintarvikekartonki	16,9	19,0	6,1	80,5	6,9
Kivihili (puolal.)	25,5	28,8	8,8	36,0*	14,1
Öljy (POR V)	40,0	40,1	0,2**	82,5	0,04
Puu	7,3	19,1	55	83,0	0,4

* = tuhkattomasta osuudesta laskettu ** = tilavuus-%.

2.4.2 Polttotekniikka

Kuljettamisen, varastoimisen ja käsittelemisen helpottamiseksi ja poltto-ominaisuuksien parantamiseksi keräyspaperi yleensä esikäsitellään. Esikäsitelyssä paperi lajitellaan, puhdistetaan, revitään, kuivataan ja tiivistetään pelleteiksi tai briketeiksi. Tämä on usein polton kannalta välttämätöntä. Taulukossa 6 esitetään erilaisia mahdollisia polttotekniikoita sekä niiden asettamia vaatimuksia.

Yleensä paperi poltetaan kattilassa yhdessä muiden kiinteiden polttoaineiden kanssa. Keräyspaperin etuna on, että sen poltto on teknisesti mahdollista suhteellisen pienissä laitoksissa. Käytännössä jätteen poltto tapahtuu nykyisin leijupolttokattiloissa, jotka voivat olla kerros- (BFB = Bubbling Fluidized Bed) tai kiertopetikkattiloita (CFB = Circulating Fluidized Bed).

On myös kehitetty tekniikoita, joilla keräyspaperista valmistetaan nestemäistä polttoainetta, metanolia tai etanolia. Toistaiseksi menetelmät eivät kuitenkaan ole vielä taloudellisesti kannattavia, mutta kehitystyö jatkuu.

Taulukko 6. Keräyspaperin polttotekniikoita.

Jätepaperin määrä t/a	Polttoaineen laatu	Tekniikka	Koko MWth	Referenssit
< 15 000	Pelletti tai briketti	Kiinteäpetikaasutus	2 - 10	Pilot-kokeita
> 20 000	Suikale	CFB-kaasutus	15 -	Pilot-kokeita
> 15 000	Suikale tai pelletti	BFB-poltto	10 -	5
> 15 000	Suikale	CFB-poltto	10 -	2

2.5 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

2.5.1 Paperin kaatopaikkasijoituksen ympäristövaikutukset

Suomessa kaatopaikalle joutuvan yhdyskuntajätteen tilavuudesta on paperia ja kartonkia noin 37 %, eli vuosittain noin 1,4 milj. m³ (536 000 t). Paperinkeräys Oy:n arvioiden mukaan kaikesta paperista ja kartongista noin 84 % on keräyskelpoista, jolloin kaatopaikoille joutuu vuosittain noin 373 000 tonnia keräyskelpoista paperia ja kartonkia. Kuitupohjaisten pakkausten kulutus Suomessa on noin 194 000 tonnia, josta 148 000 tonnia joutuu kaatopaikalle.

Paperin vaikutuksia kaatopaikalla on tutkittu varsin vähän, koska hajoamisprosessit ovat hitaita eikä nykyisen tyyppisiä kaatopaikkoja ole ollut kuin muutamien kymmenien vuosien ajan. Tehdyissä kaatopaikkakaivauksissa on löydetty mm. 30 vuotta vanhoja sanomalehtiä, jotka ovat olleet vielä lukukelpoisia. On todettu että 20 - 50 % paperi- ja kartonkijätteestä hajoaa kaatopaikalla ensimmäisten 15 vuoden aikana, mutta loppuosan hajoamiseen kuluu aikaa ei tiedetä. On esitetty myös arvioita, että osa paperi- ja kartonki-jätteestä jäisi kokonaan hajoamatta, jolloin kaatopaikka toimisi hiilinieluna.

Paperin hajotessa sen sisältämä hiili vapautuu joko kaasumuodossa hiilidioksidina ja metaanina, jotka ovat merkittäviä kasvihuonekaasuja, tai suotovesiin liuenneena, jolloin se aiheuttaa vesistöissä BOD- ja COD-kuormitusta. Jätteen sisältämästä hiilestä 40 - 50 % on arvioitu vapautuvan kaasumuodossa ja 50 - 60 % suotovesien välityksellä. Kuitupohjaisista jätteistä voi uuttua suotoveden pieniä määriä mm. paperin valmistuksen täyte- ja lisäaineita sekä painovärien eri raaka-ainekomponentteja. Eräistä paperi- ja kartonkituotteista SVA-suototestissä liuenneet raskasmetallimäärät esitetään taulukossa 7.

Paperi- ja kartonkijätteiden aiheuttama vesistökuormitus riippuu siitä, puhdistetaan kaatopaikan suotovedet vai lasketaan ne sellaisenaan vesistöön.

Paperilla ja kartongilla saattaa olla positiivisiakin vaikutuksia kaatopaikan toimintaan. Kokeissa on havaittu, että kuitupohjaisten jätteiden väheneminen kaatopaikalla saattaa vähentää suotovesien kuormitusta. Kuitupohjaiset jätteet lisäävät jätemassan kosteutta absorboimalla vettä ja edistävät näin jätepenkereen hajoamista sekä parantavat kaatopaikan kaasuntuotantoa nopeuttamalla siirtymistä me-

Taulukko 7. Paperi- ja kartonkituotteista SVA-suototestissä neutraaliin veteen liuenneet raskasmetallipitoisuudet.

Näyte	Zn mg/l	Cu mg/l	Cd mg/l
sl-kk-ptu	0,55	0,18*	0,015*
sl-kk-pton	0,10	0,18*	0,00**
sl-pk-ptu	0,19	0,16*	0,0079*
sl-pk-pton	0,16	0,17*	0,012*
alk-ptu	0,13	0,17*	0,012*
alk-pton	0,10	0,11*	0,00**
pp-kk	0,13	0,28	0,015*
pp-pk	0,16	0,17*	0,0079*
pahvi	0,12	0,19*	0,062*
npk	0,06	0,074*	0,012*

Käytetyt lyhenteet:

sl = sanomalehti

akl = aikakauslehti

pp = pehmopaperi

npk = nestepakkauskartonki

pahvi = aaltopahvi

ptu = painettu

pk = primäärikuitupohjainen

pton = painamaton

kk = keräyskuitupohjainen

* = konsentraatio < optimaalinen
mittausalue

** = konsentraatio < toteamisraja

taanikäymisvaiheeseen. Eräiden arvioiden mukaan 91 % yhdyskuntajätteen hajotessa vapautuvasta metaanista on peräisin jätejakeiden selluloosa- ja hemiselluloosakomponenteista. Tällä on positiivista merkitystä, jos kaatopaikkakaasu kerätään talteen ja käytetään energiantuotannossa, mutta negatiivisia vaikutuksia, jos metaani vapautuu ilmakehään, sillä metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Paperi- ja kartonkituotteet myös ilmeisesti vähentävät kaatopaikkakaasun mikroepäpuhtauksia.

2.5.2 Uusiomassan valmistuksen ja siistauksen ympäristövaikutukset

Keräyspaperin käytön ympäristövaikutukset massanvalmistuksessa vaihtelevat huomattavasti riippuen raaka-aineen laadusta, käytetystä siistausmenetelmästä, valkaisusta ja lopputuotteelta vaadittavasta laadusta.

Uusiomassalla tarkoitetaan yleensä vain mekaanisesti puhdistettua keräyspaperista tai -kartongista valmistettua massaa. Mekaanisessa puhdistuksessa käytetään energian lisäksi myös jonkin verran kemikaaleja, ureaa ja ferrosulfaattia. Puhdistuksen energiankulutus on noin 170 kWh/t. Uusiomassan valmistuksessa syntyy jätevettä keskimäärin 7,5 m³/t. Prosessin BOD₇-päästö on noin 10 kg/t ja COD-päästö 25 kg/t. Kiintoainetta jätevesien mukana pääsee noin 6,5 kg/t. Esitetyt päästömäärät ovat ennen jäteveden puhdistusta. Epäpuhtauksien mekaanisessa erotuksessa syntyy kuitupitoista jätettä 40 kg/t massaa.

Keräyspaperin siistäminen vaatii enemmän energiaa ja kemikaaleja kuin pelkkä mekaaninen puhdistus. Siistatun massan valmistamiseen kuluu sähköenergiaa noin 450 kWh/t ja lämpöenergiaa noin 1.100 kWh/t. Tavallisessa siistauksessa käytetyt kemikaalimäärät esitetään taulukossa 8. Jätevettä siistausprosessissa syntyy 10 - 12 m³/t, ja prosessin BOD₇ päästöt ovat 10 - 11 kg/t ja kiintoaine-päästöt 1 - 5 kg/t. Kemiallinen hapenkulutus (COD) on 30 - 35 kg/t, fosfori-kuorma on keskimäärin 20 - 60 g/t ja typpikuorma 175 - 400 g/t. Orgaanisen kloorin, raskasmetallien ja PCB:n pitoisuudet ovat pieniä. Siistausprosessin jätevesi on helposti puhdistettavissa biologisin menetelmin, joten vesistöihin laskettu jätevesikuorma on huomattavasti edellä lueteltuja arvoja pienempi. Jätevesien puhdistusprosessissa syntyy noin 30 kg/t lietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus on 30 - 40 %.

Taulukko 8. Siistauksessa käytetyt kemikaalit laskettuina 100 % väkevyyksinä.

Kemikaali	Kulutus kg/t siistausmassaa
Natriumhydroksidi	20
Vesilasi	25
Vaahdotusaine	10
Kalkki	5
Kompleksin muodostaja (DTPA)	2
Vetyperoksidi	12
Rikkihappo	8
Talkki	12
Muut (dispergointiaineet ym.)	1
Yhteensä	95

Painovärin poistovaiheessa syntyy ns. painoväri- ja lietteä 50 - 250 kg keräyspaperitonniä kohti. Liete sakeutetaan 35 - 50 %:n kuiva-ainepitoisuuteen esimerkiksi suotonauhapuristimilla. Liete sisältää 50 % kuituja, 45 % täyteaineita ja 4 % painoväriä. Lietteen raskasmetallipitoisuudet ovat pienemmät kuin rajat, jotka on asetettu asumavesilietteen käytölle maanviljelyyn, paitsi Cd-pitoisuuden osalta, jonka ohjearvo alennettiin 30 ppm:stä 3 ppm:ään. PCB-pitoisuus alittaa reilusti ongelmajätteelle asetetut rajat.

Siistausjätteen kaatopaikkasijoittamiselle on pyritty keksimään vaihtoehtoja. Polttamalla jätteen tilavuus saadaan pienemmään murto-osaan, mutta energian talteenottoa ei ole pidetty kannattavana korkeiden kosteus- ja tuhkapitoisuuksien vuoksi. Vaikka siistausliete olisi mahdollista saada täysin kuivana, olisi sen lämpöarvo parhaimmillaankin vain 15 MJ/kg. Märkähapetusprosessilla, joka tapahtuu 300 °C:n lämpötilassa, on mahdollista saada täyteaine varsin käyttökelpoisena talteen. Muita mahdollisia käyttökohteita ovat rakennusteollisuus tai maanparannus. Jätteen mineraaliaines tai sen polton tuhka sisältää kalsiumkarbonaattia, joka voisi toimia maaperän pH:n puskurina happamoitumista vastaan.

Keräyspaperin käytöllä paperi- ja kartonkiteollisuuden raaka-aineena on myös positiivisia ympäristövaikutuksia. Kaatopaikkakuormitus ja siellä syntyvät CH₄-päästöt vähenevät. Lisäksi puuraaka-ainetta säästyy ja vapautuu käytettäväksi muihin tarkoituksiin, kun keräyspaperin käyttö vähentää ensiökuidun tarvetta.

2.5.3 Keräyspaperin energiahyötykäytön ympäristövaikutukset

Paperin poltossa syntyy päästöjä ilmakehään sekä kiinteää jätettä eli tuhkaa. Paperin poltosta syntyvät SO₂-, NO_x-, hiukkas-, raskasmetalli- ja hiilidioksidipäästöt ovat joko alemmat tai samalla tasolla kuin useimmilla muilla polttoaineilla. Rikkidioksidipäästö on noin 20 mg SO₂/MJ, joten erillistä rikinpoistoa ei tarvita nykyisten päästörajojen alittamiseksi. Typpidioksidipäästö on noin 85 mg NO_x/MJ.

Hiukkas- ja raskasmetallipäästöt vaihtelevat huomattavasti eri paperi- ja kartonki-tuotteiden välillä. Taulukossa 9 esitetään Berliinin teknillisessä korkeakoulussa tehdyissä polttokokeissa mitattuja savukaasujen hiukkas- ja raskasmetallipitoisuuksia ennen savukaasujen puhdistusta. Sähkö- tai kuitusuodattimella saadaan savukaasuista erotetuksi yli 99 % hiukkasista ja yli 90 % useimmista raskasmetalleista. Elohopean poistaminen tavallisilla suodattimilla ei onnistu elohopean matalan höyrystyslämpötilan vuoksi. Taulukossa 10 esitetään samoissa polttokokeissa mitattuja tuhkan raskasmetallipitoisuuksia.

Taulukko 9. Savukaasujen hiukkas- ja raskasmetallipitoisuuksia kuitutuotteiden poltossa redusoituna 12 %:n CO₂-pitoisuuteen kuivissa savukaasuissa.

Päästökomponentti	Paperi- ja kartonkilaji				
	Sanoma-lehti	Pahvit	Kartongit	Etiketit	Al-PE-kartongit
Hiukkaset	337	83	459	1 210	209
Lyijy	0,78	1,86	4,58	3,54	0,13
Kadmium	0,67	0,39	0,10	0,07	0,59
Kromi	8,76	1,77	51,0	114,8	3,75
Kupari	0,23	0,22	1,16	4,42	0,38
Nikkeli	3,83	0,74	13,6	35,7	1,56
Sinkki	1,19	7,91	13,5	27,9	0,33
Rauta	27,4	10,1	132,5	241,2	17,1

Taulukko 10. Tuhkan raskasmetallipitoisuuksia.

Komponentti	Paperi- ja kartonkilaji				
	Sanoma-lehti	Pahvit	Kartongit	Etiketit	Al-PE-kartongit
Lyijy	232	150	203	134	326
Kadmium	3,7	4,7	3,8	5,5	814
Kromi	ND	3,7	ND	ND	59
Kupari	135	217	111	173	137
Nikkeli	28	36	93	48	61
Sinkki	406	305	492	495	575
Rauta	5 186	6 366	5 692	2 194	4 637

Eri paperilajit sisältävät pieniä määriä myrkyllistä dioksiinia, josta kuitenkin suurin osa häviää sopivissa palamisolosuhteissa, joten dioksiini ei tuota ongelmia paperin poltossa.

Jos keräyspaperin energiahyötykäytön ympäristövaikutuksia verrataan fossiilisten polttoaineiden käytön ympäristövaikutuksiin, puhuvat monet seikat keräyspaperin energiakäytön puolesta. Keräyspaperin poltolla on mm. seuraavia etuja:

- Keräyspaperi koostuu 90-prosenttisesti uusiutuvasta raaka-aineesta, eli keräyspaperi on biopolttoainetta, jonka poltossa syntyvä energia voidaan hyödyntää sähköinä ja lämpönä.
- Keräyspaperin poltosta vapautuva CO₂ on biogeenistä, eli se sitoutuu uudelleen kasvavaan metsään eikä näin ollen lisää ilmakehän CO₂-pitoisuutta.
- Polttamalla paperin tilavuus pienenee 90 %, ja jäljelle jäävä kuona on inerttiä ja kelpaa hyvin esim. tienrakennukseen tai kaatopaikkojen peitemaaksi.
- Keräyspaperi on polttoaineena vähintään yhtä puhdasta kuin kiinteät fossiiliset polttoaineet. Mm. rikkipitoisuus on huomattavasti alhaisempi.
- Keräyspaperin raskasmetallipitoisuudet ovat pienempiä kuin fossiilisilla polttoaineilla.
- Kun paperi poltetaan kaatopaikalle viemisen sijaan, säästetään kaatopaikkatilaa ja vältetään kaatopaikalla mätänemisestä syntyvät CH₄-päästöt. CH₄ on CO₂:ta selvästi voimakkaampi kasvihuonekaasu. Jos, kuten kaatopaikka- ja polttovertailuissa on tehtävä, vertaillaan tietyn hiilimäärän muodostamia CO₂- ja CH₄-määriä (moolivertailu), on CH₄:n kasvihuonevaikutus 20 vuoden ajanjaksolla noin neljä kertaa suurempi kuin CO₂:n (IPCC 1992). Toisaalta on otettava huomioon, että paperin hajoaminen hiilidioksidiksi ja/tai metaaniksi tapahtuu kaatopaikalla hitaasti ja voi jäädä osittaiseksikin. Kaatopaikalta osa metaanista voidaan ottaa talteen energiantuotantoa varten.

2.5.4 Ympäristövaikutusten vertailua

Tällä hetkellä on julkaistu jo useita tutkimuksia, joissa mm. elinkaarianalyysin avulla on pyritty vertailemaan paperi- ja kartonkituotteiden kierrätyksen, energiahyötykäytön ja kaatopaikkasijoituksen ympäristövaikutuksia. Tutkimuksissa on usein päädytty toisistaan huomattavasti poikkeaviin lopputuloksiin.

Ympäristövaikutusten vertaileminen eri vaihtoehtojen välillä on erittäin monimutkaista. Ensinnäkin ympäristövaikutuksia arvioitaessa käsitellään niin laajoja kokonaisuuksia, että on välttämätöntä tehdä karkeitakin oletuksia, yksinkertaisuuksia ja rajauksia, joilla voi olla ratkaiseva vaikutus lopputulokseen. Toiseksi erilaisten päästöjen tai muiden ympäristövaikutusten vertaileminen toisiinsa edellyttää jonkinlaista arvottamis- tai painotusmenetelmää, jolle ei ole olemassa selkeää tieteellistä pohjaa vaan se perustuu myös pelkkiin mielipiteisiin.

Yleisesti kuitenkin ollaan sitä mieltä, että jonkinlainen keräyspaperin hyötykäyttö on ympäristön kannalta edullisempi vaihtoehto kuin kaatopaikkasijoittaminen. Kaatopaikalla paperi kuitenkin aiheuttaa päästöjä ilman, että vastineeksi saataisiin jotain varsinaista hyötyä, vaikka paperilla saattaakin olla joitain positiivisia vaikutuksia kaatopaikan toimintaan. Eräässä tutkimuksessa kaatopaikkasijoittamisesta oli tosin saatu ilmakehän hiilidioksiditaseen kannalta paras vaihtoehto olettamalla suurimman osan paperin sisältämästä hiilestä varastoituvan kaatopaikalle ikuisiksi ajoiksi.

Huomattavasti vaikeampaa ja enemmän erimielisyyksiä aiheuttavaa on paperin kierrätyksen ja energiahyötykäytön vertaileminen toisiinsa. Ensinnäkin on valittava, millaista massaa keräyskuitumassalla oletetaan korvattava. Suurin osa keräyspaperista käytetään siistaamattomana korvaamaan korkeaan kappalukuun keitettyä kemiallista massaa kartonkituotteiden valmistuksessa. Saavuttaakseen samat lujuusominaisuudet on keräyskuitukartongin kuitenkin oltava paksumpaa kuin ensiökuidusta valmistetun. Toisin sanoen keräyskuitumassaa tarvitaan saman kartonkimäärän valmistamiseen suurempi määrä kuin ensiökuitu-massaa, mikä osaltaan monimutkaistaa ympäristövaikutusten vertailua.

Siistattua massaa verrataan usein TMP-massaan. Tulevaisuudessa, keräyspaperin käytön yhä lisääntyessä ja siistaustekniikan kehittyessä siistatulla massalla tullaan ilmeisesti korvaamaan enemmän myös esimerkiksi sellua hienopapereissa. Mitä korkealaatuisemmissa tuotteissa keräyskuitumassaa käytetään, sitä paremmin se täytyy puhdistaa. Tämä vaatii usein enemmän kemikaaleja ja energiaa sekä lisää syntyvän siistauslietteen määrää, riippuen tietenkin raaka-aineena käytetyn keräyspaperin laadusta.

Toinen suuri ongelma ympäristövaikutusten vertailussa ovat energiantuotanto ja sen aiheuttamat päästöt. Luonnollisesti lopputulos on täysin erilainen, jos tarvittava energia oletetaan tuotettavan ydin- tai vesivoimalla, kuin jos se oletetaan tuotettavan vanhalla hiilivoimalaitoksella. Ratkaisevaa lopputuloksen kannalta on myös se, miten tuotettua energiaa paperin poltolla tuotetun energian oletetaan korvaavan ja otetaanko kierrätyksessä huomioon säästyvän puumateriaalin energiasisältö.

Usein paperin kierrätyksen on todettu säästävän energiaa ja metsiä sekä vähentävän jonkin verran vesistökuormitusta paperin energiahyötykäyttöön verrattuna. Toisaalta on väitetty kierrätyksen lisäävän fossiilisten polttoaineiden kulutusta ja sitä kautta päästöjä ilmakehään. Massan valmistaminen ensiökuidusta kuluttaa enemmän energiaa, mutta suurin osa saadaan sellunkeiton jäteliemistä sekä keräyspaperista, jolloin fossiilisten polttoaineiden tarve on vähäisempi kuin kierrätyksessä. Lisäksi siistausjätteen muodostuminen lisää kaatopaikkakuormitusta paperin polttoon verrattuna. Paperin kierrätyksen on arvioitu myös lisäävän kuljetusten tarvetta jonkin verran ja näin kasvattavan liikenteen aiheuttamia päästöjä.

Edellä esitettyihin tuloksiin päädyttyäessä ei kuitenkaan ole otettu huomioon sitä mahdollisuutta, että kierrätyksessä säästyvä puuraaka-aine voitaisiin käyttää energiantuotannossa. Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa on otettu huomioon myös

tämä mahdollisuus sekä lisäksi vertailtu tilanteita, joissa keräyspaperi tai puu energiantuotannon raaka-aineena on joko öljyä tai haketta. Saatuja tuloksia on edelleen käsitelty neljällä eri arvotusmenetelmällä. Tässä tutkimuksessa yhtä poikkeusta lukuun ottamatta paperin kierrättäminen oli ympäristöä vähiten kuormittava vaihtoehto.

2.6 KUSTANNUKSET

2.6.1 Paperin kaatopaikkakäsittelyn kustannukset

Tiukkenevat ympäristömääräykset nostavat jätteen kaatopaikkakäsittelyn kustannuksia jatkuvasti. Vuoden 1992 Suomen valtakunnallisen kaatopaikkarekisteriaineiston mukaiset keskimääräiset yhdyskuntajätteen käsittelymaksut esitetään taulukossa 11. Maksut perustuvat kuljetustapaan, jolla jätteet on kuljetettu kaatopaikalle.

Taulukko 11. Yhdyskuntajätteen keskimääräiset käsittelymaksut.

Kuljetustapa	Jätteenkäsittelymaksu	
	mk/t	mk/m ³
Puristava jäteauto	85,5	43,5
Siirtolavasäiliö	109,1	32,9
Muu kuljetus	91,9	28

2.6.2 Paperin kierrätyksen kustannukset

Paperin kierrätyksen kustannukset muodostuvat paperin keräyksestä, käsittelystä (lajittelusta, paalauksesta, repimisestä, mahdollisesta siistauksesta, keräyskuidun vaikutuksesta tuotteen valmistusprosessiin sekä kuljetuksista.

Suomessa lajitellun keräyspaperin hinta rahteineen paperitehtaalla on 300 - 700 mk/t. Yleisimmin käytetyn keräyspaperilajin, kotikeräyspaperin, hinta paperitehtaalla tai siistaamolla on noin 350 mk/tonni, josta rahdin osuus on 70 - 80 mk/t.

Eräissä tutkimuksissa (Taskinen 1992) arvioitiin paperin kierrätyksen kustannuksia siistaamolla, joka käyttää raaka-aineena keräyspaperia 100.000 t/am, kun saanto on 85 %. Siistausmassan hinnaksi saatiin laskelmissa 1 011 mk/t, jos siistaamo oli paperitehtaan yhteydessä. Erillisellä siistaamolla tuotetun massan hinta paperitehtaalla oli 1 268 mk/t. Vastaavan neitseellistä kuitua raaka-aineenaan käyttävän massan (hierteen) valmistuskustannuksiksi arvioitiin 1 100 mk/t.

Olellaista kustannusvertailussa on ensinnäkin keräyskuidun hinta suhteessa neitseelliseen kuituun ja toiseksi energian hinta. Tällä hetkellä keräyspaperin hinnat ovat maailmalajajuisesti rajussa nousussa, joidenkin keräyspaperilajien hinnat ovat nousseet nopeasti jopa kymmenkertaisiksi. Edellä mainituissa laskelmissa keräyspaperin lähtöhinnaksi oletettiin 200 mk/t. Jos tämä hinta yllättäen nousisi moninkertaiseksi kuitupuun hinnan pysyessä vakiona, olisi laskelmien tulos hyvin toisenlainen. Energian hinta on laskelmien kannalta merkityksellinen, sillä hier-

teen valmistus kuluttaa 5 - 6 kertaa enemmän energiaa kuin siistausmassan valmistus, jolloin melko pienetkin muutokset energian hinnassa näkyvät heti valmistuskustannusten erona.

2.6.3 Keräyspaperin energiahyötykäytön kustannukset

Paperin polton kustannukset muodostuvat keräyksen ja esikäsittelyn (repimisen, pelletoinnin tms.), kattilan ja polttoaineen syöttö- ja käsittelylaitteiden investoinneista sekä käyttökustannuksista.

Paperin korvatta fossiilista polttoainetta paperitehtaan energiantuotannossa, nousee paperinvalmistuksen kokonaiskustannus. Lisäkustannuksia aiheuttavat paperin toistaiseksi korkeampi polttoainehinta verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin sekä kattilan polttoaineen käsittely- ja syöttölaitteiden muutostöiden kustannukset.

Samassa tutkimuksessa kuin edellisen kappaleen paperin kierrätyksen kustannusten arviointi on paperin energiahyötykäytön kustannuksia arvioitu seuraavasti:

Keräyspaperin hinta ennen käsittelyä	200 mk/t
Esikäsittelyn kustannukset	33 mk/t
Paperin hinta esikäsittelyn jälkeen	233 mk/t
Kuljetus voimalaitokselle	80 mk/t
Paperin hinta voimalaitoksella	313 mk/t
Vaikutus paperinvalmistukseen	
Paperin käyttö polttoaineena nostaa paperinvalm. kust. verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin	9,95 mk/t
Muutostöiden aiheuttamat kustannukset	9,44 mk/t
Paperinvalmistuskustannukset käytettäessä primäärikuitua	
1. Ostopolttoaineena kivihiili	2 300 mk/t
2. Ostopolttoaineena keräyspaperi	2 319 mk/t

Paperin lämpöarvoksi on edellä esitetyissä laskelmissa oletettu 16 MJ/kg, jonka perusteella paperin polttoainehinnaksi on saatu 70 mk/MWh. Tehtaan ostopolttoaineen tarpeeksi on arvioitu 0,35 MWh/t, ja polttoaineeksi tarvittavan paperin määräksi on saatu 79,5 kg/t. Todellisuudessa tarvittava paperimäärä kyseisen energian tuottamiseksi on 10 - 25 % suurempi, sillä kattilahyötysuhde on 80 - 90 %, mitä laskelmassa ei ilmeisesti ole otettu huomioon.

Erilaisten paperilajien polttoainehintojen on arvioitu olevan 50 - 85 mk/MWh. Halvinta on vahattu kartonki ja kalleinta sekalainen jätepaperi. Arvioissa eri keräyspaperilajien hinnat sekä käsittely- ja kuljetuskustannukset on oletettu samoiksi, jolloin ero polttoainehintaan määräytyy ainoastaan lämpöarvon mukaan. Tämä oletus saattaa aiheuttaa merkittävänkin virheen arvioihin. Fossii-lisista polttoaineista kivihiilen hinnaksi on arvioitu 43 mk/MWh ja turpeen 50 mk/MWh.

2.6.4 Kustannusten vertailua

Edellisten kappaleiden laskelmien perusteella voidaan vertailla vaihtoehtoja, joista toisessa valmistetaan keräyspaperista siivousmassaa ja tarvittava energia tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla tai valmistetaan TMP-massaa, johon kuluva energia tuotetaan keräyspaperilla. Edellisessä vaihtoehdossa massatontin tuotantokustannukset olisivat 2 211 - 2 468 mk riippuen siitä, olisiko kyseessä integroitu vai integroimaton laitos. Jälkimmäisessä tapauksessa kustannukset olisivat 2 319 mk massatonttia kohti.

Ratkaisevaa kustannusten vertailun kannalta on keräyspaperin hinta, joka saattaa vaihdella huomattavasti. Jos ainoana vaihtoehtona on kaatopaikkasijoitus, saattaa hinta olla jopa nolla, ellei peräti negatiivinen. Myös esimerkiksi mahdollinen haittaveron ilmaston hiilidioksidipitoisuutta lisääville polttoaineille parantaisi paperin polttoainekäytön kannattavuutta fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna.

Tässä vertailussa keräyspaperin hinta on arvioitu samaksi riippumatta siitä, käytetäänkö sitä energiantuotantoon vai massanvalmistukseen. Kuitenkin on ilmeistä, että hyvälaatuinen, hyvin massanvalmistukseen soveltuva keräyspaperi kierrätetään joka tapauksessa ja energiahyötykäyttö tulisi kyseeseen huonolaatuisen ja halvemmän keräyspaperijakeen kohdalla, jonka käyttäminen massanvalmistuksessa olisi ongelmallista ja siten saattaisi nostaa kustannuksia.

3 JÄTEPAPERIN POLTTOKOKEET

3.1 YLEISTÄ

Polttokokeiden jät-paperilaaduksi valittiin esiselvityksen perusteella Serlan tiivispaperihylkyrullat, paalattu ruskea käärepaperi sekä Raflatac-tarrapaperin ja murskatun rakennusjätepuun seos. Kokeet ajettiin 14. - 18. marraskuuta 1994 Mäntän Energia Oy:n kerrosleijupolttokattilalla. Jät-paperi käsiteltiin Eko-Rousku-murskaimella ennen syöttöä pääpolttoaineena toimineen turpeen joukkoon. Paperin polttoaineosuuden kasvattamiseksi kattilaa ajettiin puoliteholla. Paperin massavirta oli noin 3 t/h ja osuus polttoainetehosta keskimäärin 20 %. Ennen jokaista paperinpolttokoetta ajettiin nollakoe pelkällä turpeella.

3.2 MITTAUSMENETELMÄT

Päästöjen mittauspaikat olivat pystykanava ennen luvoa sekä vaakakanavat ennen sykklonia, ennen sähkösuodatinta ja sähkösuodattimen jälkeen.

Savukaasun hiukkaspitoisuus sähkösuodattimen jälkeen mitattiin standardin SFS 3866 mukaisesti Sick SHC-5 Gravimat -laitteistolla. Hiukkaspitoisuudet ennen sähkösuodatinta ja ennen sykklonia mitattiin SF-laitteistoilla. Näytteitä otettiin 2 - 3 kpl/koe.

Savukaasun SO₂-pitoisuudet mitattiin fluoresenssiin perustuvalla Monitor Labs Model 8850 -analysointilaitteella. NO- ja NO_x-pitoisuudet mitattiin Monitor Labs 8840 (kemiluminenssi) -analysointilaitteella.

Savukaasun O₂-pitoisuus mitattiin jatkuvatoimisesti Servomex 570A -analysointilaitteella. CO-pitoisuudet mitattiin IR-analysointilaitteella Fuji ZRC. CO₂-pitoisuudet mitattiin IR-analysointilaitteella PPM-IPA. N₂O-pitoisuudet mitattiin IR-analysointilaitteella Uras 10E.

SO₂- ja NO_x-pitoisuudet mitattiin kosteista savukaasuista EPM-laimennussondilla käyttäen. O₂-, CO₂-, N₂O- ja CO-pitoisuudet mitattiin kuivista savukaasuista.

Analysointilaitteet kalibroitiin jokaisen koepäivän alussa ja lopussa.

Hiukkaspitoisuusmittauksia lukuun ottamatta em. mittaukset olivat jatkuvatoimisia, tiedon keruu tehtiin dataloggerilla ja PC:llä (Fluke Helios I ja Toshiba 3200 SX). Tallennusväli oli 30 sekuntia.

Raskasmetallinäytteet kerättiin kaasumaisten metallien osalta SFS 3869:n mukaisesti kuplituskeräimellä 2 M HNO₃ -liuokseen. Hiukkasiin sitoutuneet raskasmetallit määritettiin isokineettisesti imetyistä hiukkasnäytteistä.

Kaasumaiset fluoridit ja kloridit kerättiin standardien SFS 5789 ja VDI 3480 mukaisesti tislattuun veteen, josta pitoisuudet analysoitiin suoraan. Hiukkasiin sitoutuneet fluoridit ja kloridit määritettiin sähkösuodattimen suppilolta otetuista

lentotuhkanäytteistä. Orgaaniset yhdisteet kerättiin XAD-hartsiiin. Orgaanisten yhdisteiden näytteenoton teki Jyväskylän Yliopisto ja analyysit Kuopion yliopisto.

Kokeiden aikana otettiin polttoainenäytteet noin tunnin välein. Näistä tehtiin kokoomanäytteet, jotka analysoitiin Ahlströmin laboratoriossa. Savukaasujen koostumukset on laskettu ja muunnokset ppm>mg/m³n tehty polttoaineanalyysien perusteella.

3.3 PAPERINPOLTTOKOKOKEIDEN TULOKSET

3.3.1 Laitoksen tila

Laitoksen tila mittausten aikana oli seuraava (0-kokeen arvoina on taulukossa 12 käytetty kolmen 0-kokeen keskiarvoja):

Taulukko 12. Laitoksen tila mittausten aikana.

Koe n:o		P1	P2	P3	nollakoe
Kattilan kuormitustaso	%	55	60	60	60
Koe pvm		16.11	17.11	18.11	16/18.
Koe alkoi	klo	13.30	13.00	11.00	
Koe päättyi	klo	15.30	16.00	13.00	
Höyry					
- määrä	t/h	55	61	61	62
- paine	bar	83	84	83	83
- lämpötila	°C	504	506	506	508
Syöttövesi					
- paine	bar	122	122	122	121
Polttoaineteho	MW				
- turve		37	41	43	53
- paperi		11	11	10	-
- yhteensä		48	52	53	53
Petilämpötila	°C				
- keskiarvo		868	896	905	879
Savukaasut, ennen luvoa					
- lämpötila	°C	261	268	204	227
Savukaasut, katt. jälkeen					
- lämpötila	°C	145	146	148	148
- O ₂ , kost. ennen luvoa	%	3,6	5,1	3,6	2,9

3.3.2 Kaasumaiset päästöt

Yhteenveto kaasumaisten päästöjen mittauksista on koottu taulukkoon 13.

Taulukko 13. Yhteenveto kaasumaisten päästöjen mittauksista.

Koe n:o		P1	P2	P3	Nollakoe
Kattilan kuormitustaso %		55	60	60	60
Koe pvm		16.11.	17.11.	18.11.	16. - 18.11.
Koe alkoi		klo	13.30	13.00	11.00
Koe päättyi		klo	15.30	16.00	13.00
Savukaasut, ennen luvoa					
- Kosteus, taseesta	v-%	18	20	21	23
- O ₂ (kuiva)	v-%	5,8	4,6	3,9	4,0
- (kost.)		4,8	3,7	3,1	3,1
- CO ₂ (kuiva)	v-%	13,4	14,0	15,1	14,9
- SO ₂ (kosteaa)	ppmv	70	90	113	91
-	mg/m ³ n	205	263	331	265
-	mg/MJ	100	120	143	120
- NO _x (kosteaa)	ppmv	138	104	113	130
-	mg/m ³ n	283	214	232	267
- (NO ₂ :na)	mg/MJ	138	97	100	121
- CO (kuiva)	ppmv	436	841	489	132
-	mg/m ³ n	545	1051	611	165
-	mg/MJ	216	385	208	60
- N ₂ O (kuiva)	ppmv	51	82	55	24
-	mg/m ³ n	100	162	108	48
-	mg/MJ	40	59	37	17
- HCl (kosteaa)	mg/m ³ n	56	31	46	26
-	mg/MJ	22	11	16	9

O₂-pitoisuus vaihteli kokeissa voimakkaasti, mikä näkyi myös muiden kaasumaisten komponenttien mittauksessa. O₂:n huojunta oli suurimmillaan kokeessa P2, yli 10 %, kun se nollakokeissa oli noin 3 %.

CO-pitoisuudet olivat suurimmat kokeissa P2 ja P3, joissa korkeimmat CO-piikit olivat yli 2 000 ppm.

3.3.3 Polttoaineanalyysit

Turvenäytteistä tutkittiin 16. ja 18.11. otetut näytteet. Näistä analysoitiin tuhka-pitoisuus, lämpöarvo, haihtuvat ja lisäksi tehtiin elementaarianalyysi (C, H, N, O, S). Samat analyysit tehtiin jokaisen paperinpolttokokeen paperinäytteistä. Polttoaineiden koostumusten perusteella laskettiin jokaisen kokeen savukaasu-koostumus ja ominaissavukaasumäärä m³n/MJ.

Jätepaperin polttokokeissa käytetyn turpeen ja eri paperilaatujen polttoaine-analyysi esitetään taulukossa 14.

Taulukko 14. Jätepaperin polttokokeissa käytetyn turpeen ja eri paperilaatujen polttoaineanalyysi.

		Turve	Serla	Kääre	Raflatac
Palavat aineet	%	49,9	92,9	86,4	68,9
Tuhka	%	1,9	0,8	2,7	10,5
Kosteus	%	48,2	6,3	10,9	20,6
Lämpöarvo	MJ/kg	9,4	15,3	16,2	11,5
Kuiva-aineanalyysi					
Hiili	%	54,6	44,4	48,1	40,8
Vety	%	5,8	6,4	6,5	5,7
Rikki	%	0,2	0,4	0,4	0,2
Typpi	%	1,7	0,3	0,3	0,3
Happi	%	34,0	47,6	41,7	39,8
Tuhka	%	3,7	0,9	3,0	13,2

Serla = tiivispaperihylkyrulla

Kääre = paalattu ruskea sanomalehtipaperirullan käärepaperi

Raflatac = tarrapaperin ja rakennusjätepuumurskan seos

3.3.4 Lentotuhkan palamattomat

Lentotuhkanäytteitä otettiin sähkösuodattimen tuhkasta kokeiden aikana noin tunnin välein. Palamattomien määritykset tehtiin myös syklonin tuhkasta ja niiden osuudet esitetään taulukossa 15.

Taulukko 15. Lentotuhkan palamattomien osuudet.

Koe	Näytteenottoaikka					
	Ss. suppilot			Sykloni		
P1	6	4		10	13	
- keskiarvo	5			12		
P2	5	5	5	9	9	7
- keskiarvo	5			8		
P3	4	4	4	3	3	2
- keskiarvo	4			3		
0-kokeet	6	4	3	5	5	4 (kolme
- keskiarvo	4			nollakoetta)		
				5		

Suurimmat erot nollakokeisiin verrattuna oli kokeissa P1 ja P2, joissa palamattomien määrä syklonilta otetussa lentotuhkanäytteessä oli selvästi suurempi kuin nollakokeissa. Sähkösuodattimelta otetuissa tuhkanäytteissä ei ollut merkittäviä eroja.

3.3.5 Hiukkasmittaukset

Hiukkasmittauksia tehtiin ennen sykklonia, ennen sähkösuodatinta ja sähkösuodattimen jälkeen. Hiukkaspitoisuus ennen sykklonia laskettiin lisäksi tuhkataseesta. Tulokset esitetään taulukossa 16.

Taulukko 16. Hiukkasmittausten tulokset.

Koe n:o		P1	P2	P3	nollakoe
Kattilan kuormitustaso	%	55	60	60	60
Koe pvm		16.11	17.11	18.11	16/18.
Koe alkoi	klo	13.30	13.00	11.00	
Koe päättyi	klo	15.30	16.00	13.00	
Ilmanpaine	mmHg	731	732		
Paine kanavassa	mmvp				
- ennen sykklonia			-92		-240
- ennen sähkösuodatinta		-20			-22
Savukaasut					
- lämpötila	°C				
* ennen sykklonia			138		
* ennen sähkösuodatinta		139			136
Hiukkasmittaukset, kostea					
- ennen sykklonia	g/m ³ n				
- mitattu		3,1		2,4	
- tase		4,2	4,8	6,8	4,7
- ennen sähkösuodatinta	mg/m ³ n	382			253
- syklonin erotusaste	%	91			90
- sähkösuotimen jälkeen	mg/m ³ n	<10	<10	2	<10
	mg/MJ			1	
- sk.määrä (kostea)	m ³ n/s				
- tase		23,3	23,7	23,1	23,1

Pölypitoisuus ennen sykklonia on taseesta laskettuna suurempi kuin mittaustulos, koska taselaskelmissa ei ole huomioitu kattilaan jäävää osuutta lentotuhkasta. Erotuskykylaskelmissa on käytetty mitattua pölypitoisuutta kokeessa P0 ja taseesta laskettua kokeessa P1.

Kokeiden P0 - P2 punnituksessa käytettiin laitoksen vaakaa, jonka kalibrointi ei ollut aivan kohdallaan. Tämän vuoksi näiden kokeiden tulos on epätarkka. Hiukkaspäästö oli kaikissa kokeissa kuitenkin samaa luokkaa, alle 10 mg/m³n.

3.3.6 Muut mittaukset

Raskasmetallit

Raskasmetallinäytteet otettiin 18.11. aamupäivällä (nollakoe) ja iltapäivällä (koe P3). Tulokset esitetään taulukossa 17.

Taulukko 17. Raskasmetallinäytteiden tulokset.

Koe n:o		nollakoe	P3
Kattilan kuormitustaso	%	55	60
Koe pvm		18.11.	18.11.
Koe alkoi	klo	8.30	11.00
Koe päättyi	klo	10.30	13.00
	Metalli	(mg/m ³ n)	
	Zn	3	2
	Cd	14	2
	Cr		
	Pb	17	5
	Ni	0	0
	V	0	0
	As	0	2
	Hg	262	41
	Yhteensä	297	53

Nollanäytteen raskasmetallipitoisuudet olivat varsinkin Hg:n osalta korkeampia kuin paperinpolttokokeessa. Tämä voi johtua turpeen raskasmetallipitoisuuksien vaihtelusta tai epäpuhtauksien pääsystä näyteliukseen.

Fluoridit ja kloridit

Fluoridi- ja kloridipitoisuudet mitattiin kokeessa P2 ja saman aamupäivän nollakokeessa.

Nollakokeen fluoridit olivat 1,4 mg/m³n ja kloridit 29,3 mg/m³n. Kokeessa P3 fluoridit olivat 3,3 mg/m³n ja kloridit 57,5 mg/m³n.

Orgaaniset yhdisteet

Orgaanisten yhdisteiden näytteet otettiin 18.11. kokeessa P3 ja saman aamupäivän nollakokeessa.

Mitattu PCDD-kokonaismäärä oli molemmissa kokeissa samaa luokkaa, nollakokeessa 0,66 ng/m³n ja kokeessa P3 0,62 ng/m³n.

3.3.7 Kattilahyötysuhde

Kattilahyötysuhde laskettiin standardin DIN 1942 mukaisesti. Peruslämpötilana käytettiin 25 °C. Tulokset esitetään taulukossa 18.

Taulukko 18. Kattilahyötysuhde DIN 1942 mukaisesti.

Koe n:o		P1	P2	P3	nollakoe
Kattilan kuormitustaso	%	55	60	60	60
Koe pvm		16.11.	17.11.	18.11.	18.11.
Koe alkoi	klo	13.30	13.00	11.00	8.30
Koe päättyi	klo	15.30	16.00	13.00	10.30
Kokonaislämmönkehitys	MW	43,20	48,00	48,00	48,90
Polttoaineteho	MW				
* turve		37,10	41,49	42,86	53,42
* paperi		10,56	11,18	9,55	
Vapaa lämpö	MW				
* turve	0,11	0,12	0,12	0,15	
* paperi		0,01	0,01	0,01	
Vapaa lämpö ilmassa	MW	0,81	0,80	0,77	0,76
Puhallinteho	MW	0,38	0,36	0,36	
Tuotu lämpö yhteensä	MW	48,96	53,97	53,67	54,68
Palamattomat kaasuissa	MW	0,12	0,23	0,13	0,04
Palamattomat tuhkassa	MW	0,33	0,311	0,14	0,13
Hyötysuhde	%	87,99	88,51	89,19	89,39

Merkittävin hyötysuhdetta huonontava tekijä paperinpolttokokeissa oli palamattomien häviön kasvu, joka huononsi kattilahyötysuhdetta noin 0,3 - 0,4 % nollakokeisiin verrattuna.

4 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTARKASTELU

4.1 SAVUKAASUPÄÄSTÖJEN VERTAILUA

4.1.1 Yleistä

Tehtyjen polttokokeiden perusteella vaikuttaa siltä, ettei turpeen korvaaminen paperilla energiantuotannossa vähennä poltossa syntyviä savukaasupäästöjä, mutta muuttaa jonkin verran niiden koostumusta. Tähän vaikuttaa epäilemättä paperinpolton aikana tapahtunut suuri happipitoisuuksien vaihtelu, joka viittaa palamisen epätasaisuuteen. Tämä aiheuttaa heilahteluja savukaasujen koostumukseen mm. epätäydellisen palamisen seurauksena syntyviä CO-pitoisuuspiikkejä ja korkeita palamattomien aineiden osuuksia lentotuhkassa. Epätäydellinen palaminen huonontaa myös prosessin hyötysuhdetta, mikä näkyy eri polttokokeiden hyötysuhteita vertailtaessa. Kaikissa paperinpolttokokeissa kattilahyötysuhde oli alempi kuin nollakokeessa turpeella. Huonoin hyötysuhde oli kokeessa P1 (Serla), jossa palamattomien osuus lentotuhkasta oli selvästi korkein. Lähimmäksi nollakokeen hyötysuhdetta päästiin paperinpolttokokeessa P3 (Raflatac), jossa palamattomien osuus lentotuhkasta oli jopa alempi kuin pelkällä turpeella, mutta hiilimonoksidi-päästö kuitenkin selvästi korkeampi.

Polttokokeiden tuloksia tarkasteltaessa on vaikea löytää mitään selkeää linjaa, jonka mukaan päästöt eri vaihtoehtoissa kehittyvät. Jokaisella testatulla paperilajilla oli jokin päästökomponentti, jonka suhteen se oli kokeissa selvästi muita heikompi. Hiilimonoksidi-, typpioksiduuli- ja suolahappopäästöt olivat kaikissa paperinpolttokokeissa nollakoetta suuremmat. Kattilan säädöt eivät olleet kohdallaan, minkä vuoksi paperin lisääminen turpeen joukkoon teki polttoprosessista vaikeammin hallittavan. Paperinpolttokokeet olivat varsin lyhyitä, eikä prosessille haettu optimaalista ajotapaa. Pitempikestoissa kokeissa palaminen saadaan tasaisemmaksi prosessia tarkemmin säätämällä, jolloin myös savukaasupäästöt tiettyjen komponenttien osalta on mahdollista saada kuriin.

4.1.2 CO₂

Kun palaminen on täydellistä, kaikki polttoaineen sisältämä hiili vapautuu hiilidioksidina savukaasuihin. Jos palaminen on epätäydellistä, osa hiilestä jää palamattomiin aineksiin tai vapautuu hiilimonoksidina, joka ilmakehään joututtuaan reagoi edelleen hiilidioksidiksi. Polttoaineen hiilipitoisuudesta voidaan laskea kunkin polttoaineen CO₂-ominaispäästö. Taulukossa 19 esitetään polttokokeissa käytettyjen paperilajien ja turpeen CO₂-ominaispäästöt.

Taulukko 19. Polttokokeissa käytetyn turpeen ja eri paperilajien CO₂-ominaispäästöt.

Polttoaine	Turpe	Serla	Kääre	Raflatac
CO ₂ -ominaispäästö g/MJ	114	99	95	103

CO₂-ominaispäästö on suurin turpeella ja pienin käärepaperilla. Erot eivät kuitenkaan ole suuria. Merkityksellisempää on se, mistä hiili on peräisin. Paperin poltossa vapautuvaa hiilidioksidia voidaan pitää bioperäisenä, sillä jos metsätalous toimii kestäväällä pohjalla, kasvaa paperin raaka-aineeksi hakatun metsän tilalle uusi metsä, joka sitoo paperin poltossa vapautuneen hiilidioksidin. Näin paperin polttaminen ei lisää ilmakehän hiilidioksidikuormitusta. Turpeen uusiutuminen on niin hidasta, että sitä kulutetaan selvästi nopeammin kuin uutta muodostuu. Suurimittakaavaisen turpeenpolton voidaan siis olettaa lisäävän ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Näillä perusteilla voidaan paperia pitää ilmakehän hiilidioksidikuormituksen kannalta suositeltavampana polttoainevaihtoehtona.

4.1.3 SO₂

Kokeissa poltetuista jätepaperilajeista kahdella (Serla ja Kääre) kuiva-aineen rikkipitoisuus oli kaksinkertainen turpeeseen verrattuna ja yhdellä (Raflatac) sama kuin turpeella. Myös lämpöarvoa kohti tarkasteltuna kahden edellä mainitun keräyspaperilajin rikkipitoisuus oli turvetta korkeampi ja kolmannen hieman turvetta alempi. Tästä voidaan jo päätellä, etteivät SO₂-päästöt todennäköisesti merkittävästi laske poltettaessa jätepaperia turpeen joukossa.

Polttokokeissa SO₂-päästöt eivät kuitenkaan vaihdelleet samoin kuin eri paperilajien rikkipitoisuudet, vaan suurimmat SO₂-päästöt syntyivät kokeessa P3 (Raflatac) ja pienimmät kokeessa P1 (Serla), ollen kokeessa P3 lähes 50 % suuremmat kuin kokeessa P1. Kokeessa P2 (Kääre) SO₂-päästöt olivat samat kuin nollakokeessa turpeella. Voidaan siis todeta muiden tekijöiden kuin paperin rikkipitoisuuden vaikuttavan huomattavasti syntyvän SO₂-päästön suuruuteen.

4.1.4 NO_x ja N₂O

NO_x-päästöt olivat polttokokeissa P2 (Kääre) ja P3 (Raflatac) 15 - 20 % pienemmät kuin nollakokeessa turpeella ja kokeessa P1 (Serla) noin 15 % suuremmat. Toisaalta typpioksiduulipäästöt olivat kaikissa paperinpolttokokeissa selvästi suuremmat kuin pelkällä turpeella - kokeessa P2 jopa yli kolminkertaiset turpeeseen verrattua.

NO_x- ja N₂O-päästöt ovat polttoprosessissa usein vaihtoehtoisia; kun toista saadaan vähennettyä, toinen kasvaa. Ympäristövaikutuksiltaan yhdisteet kuitenkin eroavat toisistaan. Typpioksiduulia pidetään lähinnä melko voimakkaana kasvihuonekaasuna, kun taas typpidioksidin katsotaan olevan ympäristölle vahingollinen maaperän ja vesistöjen happamoitumisen edistäjänä.

4.1.5 CO

Hiilimonoksidipäästöt olivat kaikissa paperinpolttokokeissa selvästi korkeammat kuin pelkällä turpeella. Hiilimonoksidipäästöjä syntyy palamisen jäädessä epätäydelliseksi. Paperinpolttokokeissa palamisilman happipitoisuus vaihteli voimakkaasti eikä ilmeisesti ollut aina riittävän korkea, jolloin palaminen jäi kesken.

Prosessia paremmin säätämällä hiilimonoksidipäästöt on mahdollista saada hallintaan.

4.1.6 HCI

Suolahappopäästöt olivat kokeissa P1 (Serla) ja P3 (Raflatac) selvästi korkeammat kuin nollakokeessa ja kokeessa P2 (Kääre) hieman korkeammat.

4.1.7 Hiukkaset

Tehokkaan savukaasujen puhdistuksen ansiosta päästiin kaikissa polttokokeissa pieniin hiukkaspäästöihin, vaikka mm. kokeessa P2 (Kääre) hiukkaspitoisuus suuren palamattomien määrän takia oli ennen sykklonia selvästi korkeampi kuin nollakokeessa. Pienimmät hiukkaspäästöt olivat kokeessa P3 (Raflatac), jossa myös palamattomien määrä ennen sykklonia oli pienin.

4.2 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN VERTAILUA

Polttokokeissa käytetty jätepaperi oli sellaista, ettei sille oltu pystytty löytämään uusiokäyttömahdollisuutta, eli se ei kelvannut kierrätykseen, vaan olisi todennäköisesti joutunut kaatopaikalle. Tässä tapauksessa siis todellista tilannetta vastaa parhaiten vertailu paperin kaatopaikkasijoituksen ja energiahyötykäytön ympäristövaikutusten välillä.

Tarrapaperin ja rakennusjätepuumurskan seos olisi tuskin missään tapauksessa kelvannut massanvalmistuksen raaka-aineeksi, mutta tiivispaperihylkyrulla ja ruskea käärepaperi olisivat saattaneet olla kelvollisia uusiokartongin, wellenstoffin tai testlinerin raaka-aineeksi. Näin ollen tiivispaperihylkyrullan ja ruskean käärepaperin energiahyötykäyttöä ja ensiökuidusta valmistetun kartongin, flutingin ja kraftlinerin ympäristövaikutuksia voidaan verrata vastaavien tuotteiden valmistamiseen mekaanisesti puhdistetusta uusiomassasta.

Laskelmien pohjana olleet raaka-aineiden kulutukset ja päästöluvut perustuvat lähteeseen Jallinoja 1994.

4.2.1 Keräyspaperin energiahyötykäyttö vs. kaatopaikkasijoittaminen

Kun verrataan keräyspaperin energiahyötykäyttöä kaatopaikkasijoittamiseen, täytyy kaatopaikkavaihtoehdossa ottaa huomioon myös paperista polttamalla saatavan energian tuottaminen jollain muulla polttoaineella. Koska polttokokeissa paperilla korvattiin turvetta, tarkastellaan tässäkin sitä vaihtoehtoa.

Vertailtavat vaihtoehdot ovat seuraavat:

1. Jätepaperia poltetaan yhdessä turpeen kanssa, kuten polttokokeissa, ja tuotetaan 1 GJ energiaa.

2. Vaihtoehdossa 1 poltettu paperimäärä sijoitetaan kaatopaikalle ja 1 GJ energiaa tuotetaan pelkällä turpeella.

Turpeen noston ympäristövaikutukset jätetään tämän tarkastelun ulkopuolelle. Paperijätteen mahdollisia positiivisia vaikutuksia kaatopaikan toimintaan ja kaatopaikan toimimisesta hiilinieluna on käsitelty edellä kohdassa 2.5.1 Paperin kaatopaikkasijoituksen ympäristövaikutukset.

Paperin kuljetusmatka polttolaitokselle on todennäköisesti jonkin verran pitempi kuin matka kaatopaikalle, mutta toisaalta kaatopaikkavaihtoehdossa joudutaan turvetta kuljettamaan suurempia määriä. Se, kummassa tapauksessa tarvitaan enemmän kuljetuksia, riippuu polttolaitoksen etäisyydestä turvesuosta ja paperin keräysalueesta. Koska tässä tapauksessa ei tarkastella mitään todellista tilannetta, on kuljetusmatkojen pituuksia mahdoton arvioida. Erot kuljetusmäärissä ja niiden ympäristövaikutuksissa on jätetty näin ollen tarkastelun ulkopuolelle.

Energian tuottamiseen tarvittavien turve- ja paperimäärien laskemiseen käytetään polttokokeiden keskiarvoa. Paperinpolttokokeissa kattilahiötysuhde oli keskimäärin 88,6 % ja pelkällä turpeella 89,4 %. Poltetun paperin lämpöarvo oli keskimäärin 14,3 MJ/kg ja osuus polttoainetehosta 20,5 %. Turpeen lämpöarvo oli 9,4 MJ/kg. Näiden tietojen perusteella saadaan lasketuksi, että pelkkää turvetta tarvitaan 1 GJ:n tuottamiseen 119 kg. Turpeen ja paperin yhteispoltoissa tarvitaan saman energiamäärän tuottamiseen 95,5 kg turvetta ja 16 kg paperia.

Vaihtoehdossa 1 siis poltetaan 16 kg paperia ja 95,5 kg turvetta. Vaihtoehdossa 2 poltetaan 119 kg turvetta ja 16 kg paperia sijoitetaan kaatopaikalle. Ympäristöön eri vaihtoehdoissa syntyvät päästöt esitetään taulukossa 20, jossa paperin ja turpeen yhteispolton päästöt on laskettu keskiarvona kaikista kolmesta polttokokeesta. Hiilidioksidipäästöt on jaettu kahteen osaan, paperista aiheutuvat hiilidioksidipäästöt (p) on erotettu turpeesta peräisin olevista hiilidioksidipäästöistä (t).

Taulukko 20. Vertailtavien vaihtoehtojen ympäristöpäästöt (energiantuotanto 1 GJ).

Päästö	1. vaihtoehto		2. vaihtoehto	
	Paperin ja turpeen poltto	Turpeen poltto	Paperin kaatopaikkasijoitus	
CO ₂ (t) [kg]	99	123	-	
CO ₂ (p) [kg]	23	-	8,8	
CH ₄ [kg]	-	-	3,2	
SO ₂ [g]	121	120	-	
NO _x [g]	112	121	-	
CO [g]	336	60	-	
N ₂ O [g]	45	17	-	
HCl [g]	16	9	-	
COD [g]	-	-	320	
Kiinteä jäte [kg]	2,8	2,4	16	

(t) = turpeesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt

(p) = paperista aiheutuvat hiilidioksidipäästöt

Kuten polttokokeiden tuloksista jo huomattiin, erot pelkän turpeen sekä paperin ja turpeen seoksen poltosta syntyvissä savukaasupäästöissä eivät ole kovin suuria. Ympäristövaikutusten kannalta ehkä merkittävin ero on turpeesta peräisin olevien hiilidioksidipäästöjen väheneminen, kun osa polttoaineesta korvataan paperilla. Erot vaihtoehtojen 1 ja 2 välille syntyvät siis lähinnä päästöistä, jotka aiheutuvat paperin hajoamisesta kaatopaikalla. Kun paperi poltetaan, vältetään kaatopaikalla syntyviltä metaanipäästöiltä, jotka edistävät kasvihuoneilmiötä huomattavasti hiilidioksidia voimakkaammin.

Tässä selvityksessä on oletettu, että 75 % kaatopaikalle viedyn paperin sisällyttäessä hiilestä hajoaa siten, että puolet muodostaa hiilidioksidia ja puolet metaania. Metaania ei oteta talteen poltettavaksi. CO-, N₂O- ja HCl-päästöt ovat selvästi suuremmat vaihtoehdossa 1, mutta ympäristövaikutusten kannalta niiden merkitys on varsin pieni. Vaikka typpioksiduuli on paljon hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu, jää sen vaikutus kuitenkin hyvin vähäiseksi päästömäärän ollessa näin pieni. Hiilimonoksidin haitallisuus perustuu lähinnä sen hengityselimiä vahingoittavaan vaikutukseen. Polttolaitoksen piipun voidaan kuitenkin olettaa olevan niin korkea, että hiilimonoksidi ehtii reagoida hiilidioksidiksi ennen mahdollista joutumistaan lähelle maanpintaa.

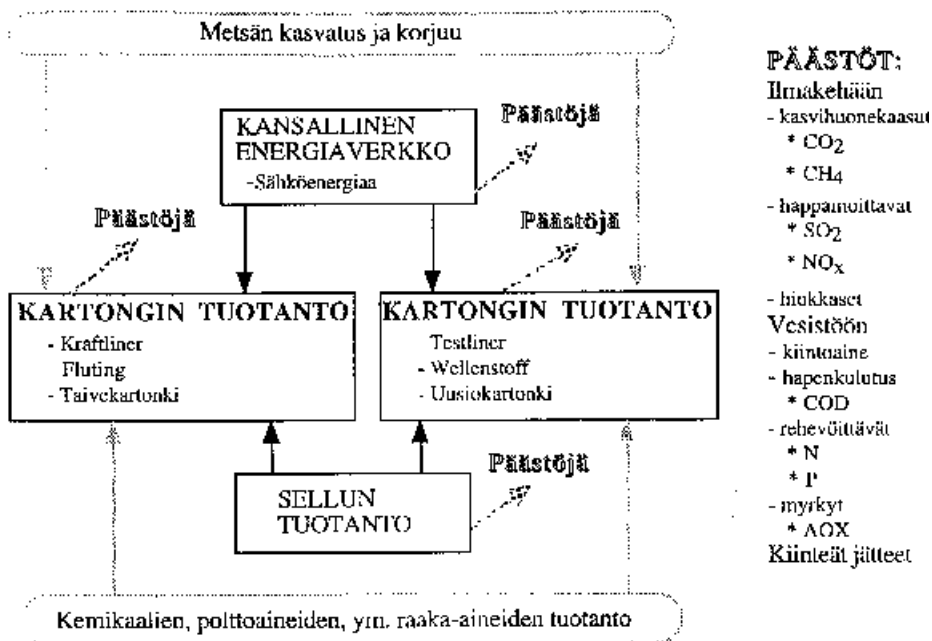
Jos paperista aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen ei katsota voimistavan kasvihuoneilmiötä ja metaani arvioidaan 11 kertaa voimakkaammaksi kasvihuonekaasuksi kuin hiilidioksidi ja typpioksiduuli 270 kertaa voimakkaammaksi (IPCC 1992 100 vuoden ajanjaksolle), saadaan 1. vaihtoehdon kasvihuonepotentiaaliksi CO₂-ekvivalenteina 111 kg ja 2. vaihtoehdon 163 kg. Jos NO_x- ja SO₂-päästöt yhdistetään happamoitumispotentiaaliksi arvioiden typenoksidien happamoittava vaikutus puolta pienemmäksi kuin rikkidioksidin, saadaan 1. vaihtoehdon happamoitumispotentiaaliksi SO₂-ekvivalenteina 177 g ja 2. vaihtoehdon 180,5 g.

Paperin poltolla vähennetään luonnollisesti kaatopaikalle joutuvan kiinteän jätteen määrää, kun ainoaksi komponentiksi jää tuhka, jota syntyy vain hieman enemmän kuin turpeenpoltossa. Tuhka on kaatopaikalla varsin inertti materiaali. Sen sijaan hajoavasta paperista suotovesiin liukenevat aineet aiheuttavat hapenkulutuskuurmitusta vesistöihin. Lopullisen vesistö päästön suuruus riippuu tietysti siitä, kuinka hyvin suotovedet puhdistetaan.

4.2.2 Neitseellinen kuitu vs. keräyskuitu

Tämän tarkastelun lähtökohtana on vertailla neitseellisestä kuidusta valmistettuja kraftlineria, flutingia ja taivekartonkia mekaanisesti puhdistetusta keräyskuidusta valmistettuihin testlineriin, wellenstoffiin ja uusiokartonkiin. Ensikuitua raaka-aineena käytettäessä se keräyspaperimäärä, joka kuluu vastaavien keräyskuitupohjaisten tuotteiden valmistamiseen, käytetään energiantuotannossa turvetta korvaamaan. Vertailtavien systeemien periaate esitetään kaaviona kuvassa 10.

Tässä vertailussa käytetty kraftliner on White-top-linera, jonka pohjakerros on valkaisuamatonta ja pintakerros valkaistua havupuusulfaattia. Testlinerin pohjakerros on pelkkää keräyskuitua ja pintakerros on valkaistua havupuusulfaattia, jolloin kartongin keräyskuitupitoisuus on 85 %. Flutingin raaka-aineena on valkaisuamaton



Kuva 10. Vertailtavan systeemin kaaviokuva. Vaaleanharmaalla piirretyt osat on jätetty laskelmissa tarkastelun ulkopuolelle.

koivusulfaatti, ja wellenstoff on valmistettu 100-prosenttisesta keräyskuidusta. Taivekartongin koostumus on 63 % kuusi-PGW-massaa, 11 % mäntysulfaattia ja 20 % koivusulfaattia sekä 6 % täyteaineita. Uusiokartongin keräyskuitupitoisuus on 70 % ja kartonki on päällystetty valkaistulla mäntysulfaatilla.

Flutingin ja taivekartongin valmistuksessa kaikki massanvalmistus on integroitua, mutta kraftlineriin valkaistu sellu tuodaan tehtaan ulkopuolelta. Keräyskuitumassan valmistus on integroitua, mutta testlineriin ja uusiokartonkiin tarvittava sellu tuodaan ulkopuolelta. Tehtaiden tekniikka vastaa keskimääräistä suomalaista tekniikkaa, ja kaikki jätevedet puhdistetaan biologisesti aktiivilietelaitoksella.

Kuituraaka-aineiden ja polttoaineiden kulutus tuotetonna kohti esitetään taulukossa 21, jossa "tarvittava energia" tarkoittaa sitä energiaa, joka tehtaalla tuotetaan muista polttoaineista kuin tuotannossa syntyneistä puujätteistä tai jäteliemistä. Taulukossa 22 esitetään kaikkien vertailtavien tuotteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt ympäristöön yhtä tuotetonna kohti.

Keräyskuitu on kartongilta vaadittavilta lujuusominaisuuksiltaan heikompaa kuin ensiökuitu, joten saman lujuuden saavuttamiseksi täytyy keräyskuitupohjaisista kartongeista tehdä paksumpia ja noin 30 % painavampia kuin ensiökuitupohjaisista. Sama massa keräyskuidusta valmistettua kartonkia on siis pinta-alaltaan pienempi kuin ensiökuidusta valmistettu, joten siitä saadaan myös vähemmän laatikoita. Tämä tekijä on otettu huomioon kertomalla keräyskuitupohjaisten tuotteiden valmistamisesta aiheutuvat päästöt ja raaka-aineiden kulutus kertoimella 1,3.

Taulukko 21. Vertailtavien tuotteiden kuluttamat kuituraaka-aineet ja polttoaineet tuotetonna kohti laskettuna.

	Kraft-liner	Test-liner	Fluting	Wellenstoff	Taivekartonki	Uusio-kartonki
Kuituraaka-aine:						
-Puu [kg]	2 328	277	1 180	0	1 490	831
-Keräyspaperi [kg]	0	952	0	1.064	0	784
Tarvittava energia [GJ]	1,3	10,0	8,9	10,4	22,0	11,8
Polttoaine [kg]						
-Turve	0	1.065	0	1.106	628	1 258
-Keräyspaperi	1 238	0	1 383	0	1 019	0
Tuotettu energia [GJ]	19,6	10,0	21,9	10,4	22,0	11,8

Paperin poltosta syntyvissä päästöissä on otettu huomioon vain polttokokeiden P1 (Serla) ja P2 (Kääre) keskiarvot, sillä vain näiden keräyspaperilajien voidaan arvioida kelpaavan tarkasteltujen tuotteiden raaka-aineeksi.

Tuotteiden valmistuksessa tarvittavien kemikaalien valmistus on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Myöskään puunkorjuun aiheuttamia ympäristövaikutuksia ei ole laskelmissa otettu huomioon. Niin ikään kuljetusten vaikutukset on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, sillä ne ovat niin tilanteesta riippuvaisia, ettei yleispuolelta arvioita tekeminen ole mielekäästä.

Taulukosta 21 nähdään, että testlinerin ja wellenstoffin valmistukseen tarvittavasta keräyspaperimäärästä saadaan energiaa huomattavasti enemmän kuin kraftlinerin ja flutingin valmistukseen tarvitaan. Tällä ylijäämäenergialla on laskelmissa oletettu korvattavan jossain muualla kulutettavaa turpeella tuotettua energiaa. Paperin polton päästöistä on vähennetty päästöt, jotka olisivat syntyneet, jos ylijäämäenergiaa vastaava energiamäärä olisi tuotettu turpeella. Näin on saatu lopputulokseksi negatiivisia turveperäisen hiilidioksidin päästöjä.

Kokonaishiilidioksidipäästöt ovat kaikissa ensiökuituvaihtoehdoissa suuremmat kuin keräyskuituvaihtoehdoissa, mutta turveperäisten hiilidioksidipäästöjen osalta kaikki keräyskuituvaihtoehdot ovat selkeästi huonompia. Erityisen suuri ero on kraftlinerin ja flutingin kohdalla, kun energiaa saadaan paperinpoltosta ylimäärin. Kraftlinerin pieni energiantarve johtuu siitä, että suurin osa energiasta saadaan sellun jäteliemistä, jolloin puolestaan puunkulutus on selvästi suurempi kuin muilla tuotteilla. Selvästi suurin energiankulutus on taivekartongilla, mikä selittyy kartonkiin käytettävällä hierteellä (PGW), jonka valmistaminen kuluttaa paljon energiaa.

Erot puunkulutuksessa vertailtavien tuotteiden välillä tulisi ottaa huomioon tuloksia tarkasteltaessa. Kraftlinerin valmistus kuluttaa 2 051 kg enemmän puuta kuin testlinerin, flutingin 1 180 kg enemmän kuin wellenstoffin ja taivekartongin 659 kg enemmän kuin uusiokartongin. Jos nämä puumäärät käytettäisiin energian-

Taulukko 22. Vertailtavien tuotteiden valmistuksesta syntyvät päästöt vesistöön ja ilmakehään sekä kiinteät jätteet.

Päästö [kg/t]	Kraftliner	Testliner	Fluting	Wellenstoff	Taivekartonki	Uusiokartonki
Päästöt ilmakehään						
CO ₂ (p)	5.265	-	3.099	-	2.599	-
CO ₂ (t)	-2 010	1 154	-1 482	1 106	673	1 387
CH ₄	12,1	28,5	12,8	27,3	9,6	29,5
SO ₂	0,99	1,37	0,85	1,25	2,48	1,93
NO ₂	0,32	1,44	1,25	1,26	2,81	2,12
Päästöt vesistöön						
COD	27,0	19,5	11,3	12,1	31,0	20,9
Kiintoaine	3,38	3,17	1,60	2,83	4,50	3,41
N	0,22	0,13	0,14	0,07	0,26	0,21
P	0,042	0,031	0,030	0,018	0,052	0,043
AOX	0,23	0,04	noina.	0,01	0,70	0,16
Kiinteä jäte	45	163	62	158	78	171

(p) = paperista, puujätteestä ja jäteliemistä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt

(t) = turpeesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt

tuotannossa korvaamaan turvetta, olisivat keräyskuitupohjaisten tuotteiden päästöt selvästi vähäisemmät kuin turveperäiset hiilidioksidipäästöt.

Metaanipäästöt ovat keräyskuituvaihtoehtoissa suurimmat. Tämä on suoraan verrannollinen kaatopaikkakuormitukseen, joka on keräyspaperin puhdistuksessa jätteeksi joutuvan kuitulietteen takia keräyskuitua massan raaka-aineena käytettäessä huomattavasti suurempi kuin ensiökuidulla.

Jos turveperäiset hiilidioksidi- ja metaanipäästöt yhdistetään kasvihuonepotentiaaliksi kuten edellä kohdassa 4.2.1, saadaan kraftlinerin arvoksi CO₂-ekvivalentteina -1 877 kg, testlinerille 1 468 kg, flutingille -1 341 kg, wellenstoffille 1 406 kg, taivekartongille 779 kg ja uusiokartongille 1 712 kg.

Rikkidioksidin osalta kraftliner ja fluting ovat testlineria ja wellenstoffia jonkin verran parempia, mutta uusiokartonki on taivekartonkia parempi. Typenoksidien osalta kraftliner on testlineria parempi, fluting ja wellenstoff suunnilleen samantaisia ja uusiokartonki taivekartonkia parempi. Jos näistä lasketaan happamoitumispotentiaalit, kuten kohdassa 4.2.1, saadaan SO₂-ekvivalentteina kraftlinerille arvo 1,15 kg, testlinerille 2,09 kg, flutingille 1,48 kg, wellenstoffille 1,88 kg, taivekartongille 3,89 kg ja uusiokartongille 2,99 kg.

Päästöt vesistöön ovat kaikkien komponenttien osalta testlinerilla ja uusiokartongilla pienemmät kuin kraftlinerilla ja taivekartongilla. COD- ja kiintoainepäästöt ovat flutingilla wellenstoffia pienemmät, mutta ravinnepäästöjen tilanne on päinvastainen.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Jätepaperin polton ympäristövaikutukset -projektissa selvittiin erilaisten kierrätettäväksi kelpaamattomien tai vaikeasti kierrätettävien jätepaperilaatujen polttomahdollisuudet ja polton päästöt. Vaihtoehtoisten jätepaperin käsittelytapojen - polton, kaatopaikkasijoituksen ja kuituraaka-ainekäytön - ympäristövaikutuksia tutkittiin systeemianalyysin avulla.

Keräyspaperin käyttöä energian tuotantoon suositellaan yleensä silloin, kun keräyspaperista on ylitarjontaa tai se ei laadullisesti kelpaa uusiomassan valmistukseen. Eräiden tutkimusten perusteella on myös ehdotettu, että kaikki keräyspaperi olisi hyödyllisintä käyttää polttoaineena.

Keräyspaperin ja fossiilisten polttoaineiden energiakäytön ympäristövaikutuksia verrattaessa puhuvat monet seikat paperin energiakäytön puolesta. Keräyspaperin poltolla on mm. seuraavia etuja:

- Keräyspaperi koostuu 90-prosenttisesti uusiutuvasta raaka-aineesta, eli keräyspaperi on biopolttoainetta, jonka poltossa syntyvä energia voidaan hyödyntää sähköinä ja lämpönä.
- Keräyspaperin poltosta vapautuva CO₂ on biogeenistä, eli se sitoutuu uudelleen kasvavaan metsään eikä näin ollen lisää ilmakehän CO₂-pitoisuutta.
- Polttamalla paperin tilavuus pienenee 90 % ja jäljelle jäävä kuona on inerttiä ja kelpaa hyvin esim. tienrakennukseen tai kaatopaikkojen peitemaaksi.
- Keräyspaperi on polttoaineena vähintään yhtä puhdasta kuin kiinteät fossiiliset polttoaineet. Mm. rikkipitoisuus on huomattavasti alempi.
- Keräyspaperin raskasmetallipitoisuudet ovat pienempiä kuin fossiilisten polttoaineiden.
- Kun paperi poltetaan kaatopaikalle viemisen sijaan, säästetään kaatopaikkatilaa ja vältetään kaatopaikalla mätänemisestä syntyvät CH₄-päästöt. Metaani on hiilidioksidia selvästi voimakkaampi kasvihuonekaasu. Jos - kuten kaatopaikka- ja polttovertailussa on tehtävä - vertaillaan tietyn hiilimäärän muodostamia hiilidioksidi- ja metaanimääriä (moolivertailu), on metaanin kasvihuonevaikutus 20 vuoden ajanjaksolla noin 13 kertaa ja 100 vuoden ajanjaksolla noin 4 kertaa suurempi kuin hiilidioksidin. On toisaalta otettava huomioon, että paperin hajoaminen hiilidioksidiksi, metaaniksi tai molemmiksi tapahtuu kaatopaikalla hitaasti ja voi jäädä osittaiseksikin. Tässä selvityksessä on oletettu, että noin 75 % kaatopaikalle viedyn paperin sisältämästä hiilestä hajoaa siten, että puolet muodostaa hiilidioksidia ja puolet metaania. Metaania ei oteta kaatopaikalta talteen poltettavaksi.

Polttokokeiden jätepaperilaaduksi valittiin esiselvityksen perusteella tiivispaperi-hylkyrullat, paalattu ruskea käärepaperi sekä tarrapaperin ja murskatun rakennusjätepuun seos. Kokeet ajettiin marraskuussa 1994 Mäntän Energia Oy:n kerros-

leijupolttokattilalla. Paperin massavirta oli noin 3 t/h ja osuus polttoainetehosta keskimäärin 20 %. Ennen jokaista paperinpolttokeetta ajettiin nollakoe pelkällä turpeella.

Polttokokeiden perusteella vaikuttaa siltä, ettei turpeen korvaaminen paperilla energiantuotannossa vähennä poltossa syntyviä savukaasupäästöjä, mutta muuttaa jonkin verran niiden koostumusta. Kokeiden tuloksia tarkasteltaessa on vaikea löytää mitään selkeää linjaa, jonka mukaan päästöt eri vaihtoehdoissa kehittyvät. Jokaisella testatulla paperilajilla oli jokin päästökomponentti, jonka suhteen se oli kokeissa selvästi muita heikompi. Hiilimonoksidi-, typpioksiduuli- ja suolahappopäästöt olivat kaikissa paperinpolttokokeissa nollakoea suuremmat. Ympäristön kannalta merkittävin ero on turpeesta peräisin olevien hiilidioksidipäästöjen väheneminen, kun osa polttoaineesta korvataan paperilla.

Kattilan säädöt eivät kokeissa olleet kohdallaan, minkä vuoksi paperin lisääminen turpeen joukkoon teki polttoprosessista vaikeammin hallittavan. Paperinpolttokokeet olivat käytännön syistä suhteellisen lyhyitä, eikä prosessille haettu optimaalista ajotapaa. Pitempikestoisessa ajossa palaminen saadaan tasaisemmaksi prosessia tarkemmin säätämällä, jolloin myös savukaasupäästöt on mahdollista saada kuriin tiettyjen komponenttien osalta. Kokeista ei aiheutunut kattilan lämpöpintojen likaantumista eikä muutakaan haittaa laitokselle.

Uusi kattilalaitos voidaan suunnitella siten, että paperin syöttö on polttoteknisesti paremmin hallinnassa, jolloin mitatun suuruisia CO- ja N₂O-vaihteluita ei esiinny. Kiertopetikattilassa voidaan päästä tuntuvasti pienempään palamattomien aineiden määrään tuhkassa, jolloin hyötysuhde ei huonone paperia poltettaessa.

Kun verrataan keräyspaperin *energiahyötykäytön ympäristövaikutuksia kaatopaikkasijoittamiseen*, on otettu huomioon paperista polttamalla saatavan energian tuottaminen jollain muulla polttoaineella. Koska polttokokeissa korvattiin turvetta paperilla, valittiin tarkasteluun tämä polttoainevaihtoehto.

Polttokokeiden perusteella tärkein ympäristövaikutusten ero on kasvihuonekaasupäästöjen määrän väheneminen, koska paperista peräisin olevan hiilidioksidipäästön ei katsota vaikuttavan kasvihuoneilmistöön. Myös kaatopaikasta tuleva metaani vähenee. Kun otetaan vielä huomioon typpioksidulin vaikutus, saadaan taulukossa 23 esitetty tulos.

Taulukko 23. Kasvihuonekaasupäästöjen vähenemä/16 kg poltettua paperia.

	kg	kg CO ₂ -ekv.
Turpeenpolton CO ₂ -säästö	24	24
Typpioksiduulin lisäpäästö	-0,028 *	-8 *
Kaatopaikan CH ₄ -säästö	3,2	35

Vähennemä yhteensä		51
Sama per kg paperia		3,2

* Paperinpoltolle säädetyssä kattilassa typpioksiduulipäästöt vähenevät huomattavasti polttokokeen arvoista.

Muiden päästöjen erot, kuten SO₂- ja NO₂-päästöjen happamoitumisvaikutukset, ovat melko pienet. Kiinteän jätteen määrä on luonnollisesti huomattavasti pienempi polttovaihtoehdossa.

Keräyspaperin toinen hyödyntämismahdollisuus on käyttö *paperi- ja kartonkituotteiden raaka-aineena*. Vertailussa oletetaan, että mekaanisesti puhdistettu keräyspaperi käytetään testlinerin, wellenstoffin ja uusiokartongin valmistukseen. Polttokokeisiin saaduista jättepapereista voitaisiin tiivispaperi ja ruskea käärepaperi mahdollisesti käyttää em. tuotteiden raaka-aineena.

Vertailukohteena oli vastaavien ensiökuitukartonkien valmistaminen ja keräyspaperin polttaminen energian tuottamiseksi. Jos - kuten kraftlinerin ja flutingin osalta - energiantarve on pienempi kuin mitä keräyspaperin poltossa kehittyi, lasketaan päästöt olettamalla, että paperin poltto korvaa turvetta jossain toisessa prosessissa. Ulkoisen sähkön tarve peitetään kehittämällä lauhdevoimaa turpeella tai paperipolttolaitteella.

Tulokset osoittavat, että kun keräyspaperi käytetään raaka-aineena verrattuna sen polttoon,

- päästöt ilmakehään lisääntyvät, paitsi tuotepaperin taivekartonki - uusiokartonki. Näidenkin kasvihuonepäästöt lisääntyvät, mutta happamoittavat päästöt pienenevät.
- päästöt vesistöön vastaavasti pienenevät, paitsi tuotepaperin fluting - wellenstoff. Näidenkin ravinnepäästöt pienenevät, mutta COD- ja kiintoainepäästöt lisääntyvät.
- puunkulutus pienenee. Jos säästetty puumäärä käytettäisiin energiantuotantoon, kasvihuonekaasupäästöt pienenisivät.

Näin ollen ympäristövaikutusten kokonaisarviointi riippuu siitä, miten eri päästöt painotetaan keskenään.

Koska merkittävämmät erot esiintyvät kasvihuonekaasujen päästöissä, esitetään taulukossa 24 kasvihuonekaasujen päästö määrät/kg keräyspaperia tämän tiedotteen eri vaihtoehdoissa.

Jos kasvihuonekaasujen paino ympäristövaikutusten arvioinnissa on merkittävä, näyttäisi tämän selvityksen tulosten valossa, että sekä kaatopaikkasijoituksen että uusiokäytön vaihtoehtona jättepaperin poltto on mielenkiintoinen mahdollisuus.

Jos esimerkiksi puolet nyt kaatopaikalle menevästä 370.000 t/a:n paperijättemäärästä voisi korvata fossiilisia polttoaineita, vähenisivät kasvihuonekaasupäästöt 0,6 - 0,7 milj. t CO₂-ekv. vuodessa. Jos sen sijaan sama jättepaperimäärä käytetään kiertokuitupohjaisen kartongin raaka-aineena, olisi kasvihuonekaasupäästöjen vähenemä pienempi, 0 - 0,2 milj. t CO₂-ekv./a.

Taulukko 24. Kasvihuonekaasujen päästömäärät/kg keräyspaperia.

Keräyspaperin käyttötapa	Kasvihuonekaasupäästöt kg CO ₂ -ekv./kg	
Kaatopaikkasijoitus	2,2	*
Raaka-aineena uusiokartonkituotannossa	2,2	0
Raaka-aineena testliner-tuotannossa	1,5	-0,7
Raaka-aineena wellenstoff-tuotannossa	1,3	-0,9
Korvaa turvetta leijukerros poltossa	1,0	-1,2
Polttoaineena taivekartonkituotannossa	-1,0	-3,2
Polttoaineena fluting-tuotannossa	-1,3	-3,5
Polttoaineena kraftliner-tuotannossa	-2,0	-4,2

* Tämän sarakkeen luvut on saatu vähentämällä edellisen sarakkeen luvuista kaatopaikkasijoituksen päästöt (2,2 kg CO₂-ekv./kg), koska vältetyt kaatopaikkapäästöt eivät sisälly edellisen sarakkeen lukuihin.

Kiertokuituvaihtoehtojen arvioinnissa ei ole otettu huomioon puunkäytön vaikutuksia metsän CO₂-nieluun eikä mahdollisuutta käyttää säästettyä puuta polttoaineena. Näiden vaikutusten selvittäminen, kuten muutenkin tehdyn systeemi-analyysin eri oletusten tarkastelu ja herkkyysanalyysi, olisi tärkeä jatkotutkimus-alue. Toinen jatkotutkimuksen aihe olisi ympäristövaikutusten erilaisten painotusmenetelmien soveltaminen saatuihin tuloksiin.

KIRJALLISUUTTA

- Aittola, J.-P. 1992. Kuitumaisen materiaalin poltto. Keräyspaperi ja sen hyötykäyttö. Esitelmä. Porvoo: INSKO. 17 s.
- Anon. 1992. IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change) (1992) Supplement. Geneva: IPCC Secretariat, World Meteorological Organization.
- Anon. 1992. Recycled fibre. Updated data for 1990. Helsinki: Jaakko Pöyry Consulting Oy. 46 s.
- Anon. 1993. Annual review. Pulp & Paper International, vol. 35, s. 1 - 92.
- Anon. 1993. Metsäteollisuus, ympäristö, luonto. Helsinki: Metsäteollisuus Ry. S. 43 - 47.
- Anon. 1994. Miljömässiga skillnader mellan återvinning/återanvändning och förbränning/deponering. Malmö: Chalmers Tekniska Högskola, Chalmers Industri-teknik, IVL ja Sveriges Industriförbund.
- Anon. 1994. Vuosikertomus. Helsinki: Paperinkeräys Oy. 39 s.
- Anon. 1994. Ympäristökatsaus, vol. 7.
- Antola, T. 1993. Paperin hajoaminen kaatopaikalla. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. 95 s.
- Aurell, R. 1990. The use of recycled fibre in newsprint - what is the limit? Paper delivered at PRIMA 21st Annual Conference, Glasgow.
- Boström, S. ym. 1990. Energiantuotannon ja -kulutuksen kasvihuonekaasujen päästöt Suomessa. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö. 49 s. (Sarja D:186).
- Cathie, K., Guest, D. A. & Haydock, R. 1991. Wastepaper usage and methods of collection. Use and abuse of recycled papers. Proc. Pira Conference, Luxembourg 1991. 19 s.
- Ehring, H.-J. 1991. Prediction of gas production from laboratory scale tests. Proc. 3rd International Landfill Symposium, Sardinia 1991. S. 87 - 113.
- Feuk, M. 1994. Dyrreturpapper gynnar svenska bruk. Ny Teknik, vol. 39, s. 8.
- Friberg, T. 1993. Nonpaper uses for recovered paper. Julkaisussa: Spangenberg, R. J. (toim.) Secondary fibre recycling. Atlanta: TAPPI Press. S. 69 - 74.
- Götttsching, L. 1993. Altpapier - unentbehrlicher Rohstoff und potentieller Brennstoff. 25. EUCEPA Conference 1993, Wien 1993. S. 207 - 242.
- Heiskanen, E. 1992. Ekotaseet ja kulutushyödykkeitä koskeva päätöksenteko. Keskustelualoitteita. Helsinki: Kuluttajatutkimuskeskus. 25 s.

- Hellgren, M., Heikkinen, L. & Suomalainen, L. 1992. Energia ja ympäristö. Helsinki: Opetushallitus, Porin teknillinen oppilaitos. S. 117.
- Huhtala, A. & Saloheimo, M. 1990. Keräyspaperi paperinvalmistuksen raaka-aineena; ympäristönsuojelullinen ja kansantaloudellinen arviointi. Helsinki: Ympäristöministeriö. 86 s. (Selvitys 86/1990).
- Jallinoja, M. 1994. Paperi- ja kartonkituotteiden yhdistetty elinkaari-inventaarimalli. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. 95 s.
- Jönson, G. 1993. Corrugated board packaging. Surrey: Pira International. S. 157 - 158.
- Kara, M. 1994. Thermal recycling of used fibre. Paperi ja puu, vol. 76, s. 44 - 49.
- Kärnä, A., Engström, J. & Kutinlahti, T. 1993. Sanomalehtipaperin elinkaari-analyysi. Paperi ja puu, vol. 75, s. 465 - 476.
- Levlin, J.-E. 1991. Uusiomassa ja sen erityispiirteet. Julkaisussa: Puusta paperiksi - paperin valmistus. Porvoo: INSKO. 28 s.
- Levlin, J.-E. & Komppa, A. 1991. Paperi, sen rakenne sekä eri paperi- ja kartonkilajit. Julkaisussa: Puusta paperiksi - paperin valmistus. Porvoo: INSKO. 20 s.
- Malinen, R., Wartiovaara, I. & Välttilä, O. 1993. Skenaarioanalyysi massanvalmistuksen kehitysvaihtoehtoista vuoteen 2010. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus. 170 s. (Julkaisuja - sarja A 123, SYTYKE-ohjelma).
- Melajärvi, H. 1993. Keräyspaperin määrä, keräyksen organisointi ja laatuluokitus eri maissa. Julkaisussa: Keräyspaperi ja sen hyötykäyttö. Porvoo: INSKO. 8 s.
- Miettinen, P. 1993. Environmental life cycle assessment and its applicability for industry. Diplomityö. Espoo: Helsinki University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. S. 13 - 54.
- Rossi, E. & Ettala, M. 1989. Pakkausjätteet kaatopaikalla. Espoo: Pakkausteknologiaryhmä r.y. 22 s. (PTR:n raportti nro 24).
- Savander, J. 1993. Keräyspaperi ja sen hyötykäyttö - ympäristönsuojelijan näkemyksiä. Julkaisussa: Keräyspaperi ja sen hyötykäyttö. Porvoo: INSKO. 8 s.
- Seppälä, S. 1993. Keräyspaperin käsittely ja siistäus teknistaloudelliselta kannalta, Keräyspaperi ja sen hyötykäyttö. Porvoo: INSKO. 24 s.
- Staff, E. P. 1994. Wastepaper - where will we end up? European Papermaker, vol. 2, s. 20 - 22.

- Taskinen, J. 1992. Kierrätyskuidun ja jätepaperin energiahyötykäyttö. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 83 s.
- Uutela, E. 1991. Future importance of recycled fibre for different paper and board grades. Use and abuse of recycled papers. Proc. Pira Conference, Luxembourg 1991.
- Viitala, M. 1993. Elinkaarianalyysi eri kartonkilajeille. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. 103 s.
- Virta, J. 1993. World-wide review of recycled fibre. Julkaisussa: Recycled fibres - issues and trends. Rooma: FAO. S. 15 - 44.
- Vertanen, S. 1993. Elinkaarianalyysi ja pakkaukset. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus. S. 40 - 41.
- Wolffson, C. 1988. Laboratory scale test for anaerobic degradation of municipal solid waste. Julkaisussa: Andersen, L. & Möller, J. (toim.) ISWA 88 Proc. 5th International Solid Waste Conference, Vol. II. Lontoo: Academic Press. S. 159 - 165.