

Puuvillapohjaisen selluloosakarbamaatin elinkaaritase

Pro gradu -tutkielma
Jyväskylän yliopisto,
Soveltavan kemian osasto
Leena Katajainen
15.12.2016

Abstract

Fashion industry is launching new trends in accelerating speed and that leads to increasing amount of discarded textiles. At the same time, there is need for new raw materials and that is why using discarded textiles in fibre manufacturing is important area of research. In an ideal scenario, textile industry would gain a closed loop economy by efficient sorting and material processing back to textile fibre. Benefits of recycling also include that discarded textiles don't need cultivation like virgin materials, such as cotton. Cotton needs large amounts of water and chemicals to grow and because of this the environment gets strained. In this research, discarded cotton textile is used to produce new regenerated textile fibre called cellulose carbamate (CCA) fibre. The process is based on derivatisation of cellulose with urea to form cellulose carbamate. Environmental impacts for 12 CCA factory models are evaluated through life cycle inventory (LCI) and global warming potential (GWP). Variables are made for three processes where one (CCA 1) is representing a new factory where materia is added to the process the first time. Second process (CCA 2) is based on CCA 1 but it has a circulation for chemicals and water. Only input needed in CCA 2 is materia that evaporates or turns in to salt. In the third process (CCA 3), chemicals and water are recycled but the need for NaOH and H₂SO₄ is 80 % less than those in CCA 2 because of electro dialysis that consumes electricity 600 % times more than CCA 2. These three processes are simulated as integrated and stand alone factories in location A and B. Results are compared with references cotton and viscose. The LCIs were calculated with VTT's SULCA 5.0 software, GWP was determined with the ReCiPe Midpoint H life cycle impact assessment (LCIA) method and allocation was done by cut-off-method. The scope of this research starts at the sorting facility and ends with 1000 kg of baled CCA fibre. As a result, the integrated CCA 3 process has 20 % smaller GWP value than CCA 2 and 60 % smaller than CCA 1 despite increased electricity consumption. The GWP reduction potential of factory integration is 25 % with CCA 1, 40 % with CCA 2 and 45 % with CCA 3. The integrated CCA 3 process has 35 % lower GWP value and 98 % lower water consumption than the reference cotton. Compared to Lenzing viscose Asia, the integrated CCA 3 has 66 % lower GWP and 90 % lower water consumption. Integrated Lenzing viscose Austria has 7 % smaller GWP than the integrated CCA 3, but CCA 3 has 93 % lower water consumption. Where CCA uses urea in the derivatisation of cellulose viscose process uses carbon disulphide that is highly toxic. As a conclusion most promising ways to decrease the GWP of the CCA process is its integration to a pulp mill and by decreasing the amount of process chemicals through efficient circulation or through electro dialysis.

Esipuhe

Tämä työ tehtiin VTT:n Espoon toimipisteen ja Jyväskylän yliopiston soveltavan kemian osaston välisenä yhteistyönä. Työn ohjaajana toimivat VTT:n puolelta Ali Harlin, Pirjo Heikkilä, Catharina Hohenthal ja Helena Wessman-Jääskeläinen sekä Jyväskylän yliopiston puolelta valvojana Raimo Alén. Työ toteutettiin VTT:n kehittämällä SULCA 5.0-ohjelmistolla aikavälillä 18.5.-2.12.2016. Työhön liittyvä kirjallisuus koottiin VTT:n kirjastopalvelun, internet-haun ja Standardoimisliiton ohjesääntöjen avulla. Haluan kiittää Ali Harlinia työn ohjaamisesta sekä mahtavasta tilaisuudesta tehdä yhteistyötä VTT:n kanssa. Samoin haluan kiittää Pirjo Heikkilää suuresta avusta kirjallisuustyön ohjaamisessa ja vierailuiden järjestämisestä kierrätyskeskukseen sekä Tampereen VTT:n toimipisteeseen. Catharina Hohenthalille ja Helena Wessman-Jääskeläiselle haluan puolestaan esittää erityiskiitokset työn ohjauksesta ja hyvän työilmapiirin luomisesta. Lopuksi kiitän Raimo Alénia viisaista neuvoista, mielenkiintoisista luennoista ja kannustamisesta tämän työn sekä opiskeluvuosieni vuosien aikana.

Sisällysluettelo

Sanasto.....	III
Lyhenteet	V
1 Johdanto	1
2 Elinkaaritaseen arvioiminen tekstiilikuiduille.....	4
2.1 Yleistä	4
2.2 Tekstiiliarvoketjun ympäristöindikaattorit	8
2.3 Kierrätetyn puuvillan allokointi.....	11
2.4 Vesijalanjäljen määrittäminen tekstiilikuidulle	17
2.5 LCA-mallinnus tekstiilituotteille	21
3 Puuvilla.....	24
3.1 Viljely	25
3.1.1 Tehotuotettu puuvilla.....	25
3.1.2 Luomupuuvilla	26
3.1.3 BC-puuvilla	27
3.1.4 Kierrätetty puuvilla.....	28
3.2 Puuvilla prosessin raaka-aineena	28
3.2.1 Puuvillan prosessointi.....	29
3.2.2 Poistopuuvillan mekaaninen prosessointi.....	30
4 Regeneroidut kuidut	32
4.1 Raaka-aine	33
4.2 Prosessointi	35
4.2.1 Viskoosiprosessi	36
4.2.2 Biocelsol	38
4.2.3 Selluloosakarbamaattiprosessi.....	38
4.2.4 Kierrätettyjen tekstiilikuitujen prosessointi.....	40
4.2.5 Lyocell.....	41
4.2.6 Ioncell	43
5 LCA valituille referensseille	44
5.1 Puuvilla	45
5.2 Viskoosi	46

6	Soveltamisalan ja tavoitteiden määrittely	52
7	CCA-prosessikaavio ja mallintaminen SULCA 5.0-ohjelmistolla	54
7.1	CCA 1	56
7.1.1	Esikäsittely	56
7.1.2	Pääprosessi	64
7.1.3	Kehruuprosessi	67
7.2	CCA 2	77
7.3	CCA 3	80
7.4	Inventaarien vertailu	83
8	LCI- ja GWP-arvot.....	84
8.1	Lajittelu.....	85
8.2	Kuljetus.....	87
8.3	CCA 1	88
8.4	CCA 2	94
8.5	CCA 3	98
8.6	Kierrätetyn puuvillan allokoiminen	103
9	Vertailu.....	105
10	Yhteenveto.....	108
	Kirjallisuuslähteet.....	112

Sanasto

Allokointi	Kierrätettävään tai kompleksissa toimivaan tuotteeseen liitettävää ympäristötaakkaa, joka on alkuperäisen tuotteen aiheuttama
Avoimuus	Tiedon esittäminen avoimesti, ymmärrettävästi ja perusteellisesti
Elinkaari	Sisältää vaiheet raaka-aineen hankinnasta loppukäsittelyyn
Elinkaariarviointi LCA	Tuotejärjestelmän elinkaaren aikaisten tuotosten ja syötteiden sekä ympäristövaikutusten koostaminen ja arviointi
Elinkaari-inventaari LCI	Elinkaariarvioinnin vaihe, jossa tuotejärjestelmän elinkaaren aikaiset syötteet ja tuotteet yhdistetään sekä kuvataan määrällisinä
Järjestelmän rajat	Tuotejärjestelmän rajapinta toiseen tuotejärjestelmään tai ympäristöön
Jäte	Tuotejärjestelmän tuotos, joka menee loppukäsittelyyn
Perusvirta	1) Tarkasteltavaan järjestelmään ympäristöstä tuleva (jalostamaton ihmisen toimesta) materiaali tai energia ja 2) tarkasteltavasta kohteesta ympäristöön suuntautuva materiaali tai energia, jota ihminen ei enää käsittele
Raaka-aine	Primaarinen tai sekundaarinen materiaali, joka käytetään halutun tuotteen tuottamiseksi
Selvityksen tekijä	Elinkaariarvioinnin tekevä ryhmä tai henkilö
Sidosryhmä	Yksilö tai ryhmä, johon elinkaariarvioinnin tulokset tai ympäristösuojeluntaso vaikuttavat tai jota ne koskevat

Systeemi	Muodostuu prosesseista ja kuljetuksista ym. vastaavista tapahtumista, jotka lasketaan elinkaari-inventaarin tai elinkaariarvion tutkimuksen rajojen sisäpuolelle
Syöte	Energia tai materiaali, joka tulee yksikköprosessiin
Toiminnallinen yksikkö	Määrällinen tuotejärjestelmän suorituskyky, jota käytetään myös referenssiyksikkönä elinkaariarvioelävityksessä
Tulosten tulkinta	Elinkaariarvioinnin vaihe, jossa vaikutusarvioinnin tai inventaarianalyysin tulokset yhdistetään soveltamisalan ja tavoitteen mukaisesti, jotta saadaan aikaan tuloksia ja johtopäätöksiä
Tuotejärjestelmä	Sisältää energia- ja materiaalivirtojen yksikköprosesseja, jotka toteuttavat määritellyjä toimintoja
Tuotos	Yksikköprosessista poistuva energia tai materiaali
Vaikutusarviointi	Elinkaariarvioinnin vaihe, jonka tarkoituksena on havainnoida tuotejärjestelmän potentiaalisten ympäristövaikutusten merkittävyyttä ja laajuutta
Vertailuväite	Ympäristöväite, joka kohdistuu samaan käyttötarkoitukseen tarkoitettun kilpailevan tuotteen paremmuuteen tai samankaltaisuuteen
Yksikköprosessi	Tuotejärjestelmän pienin osa, josta tietoa kerätään elinkaariarviointia suoritettaessa
Ympäristönäkökohta	Yrityksen tai organisaation palvelujen, tuotteiden tai toimintojen osa, joka voi olla vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa

**Ympäristövaikutus-
arviointi LCIA** Elinkaari-inventaarin pohjalta tehtävä analyysi, jossa tulokset esitetään eri ympäristöindikaattoreiden kautta.

Lyhenteet

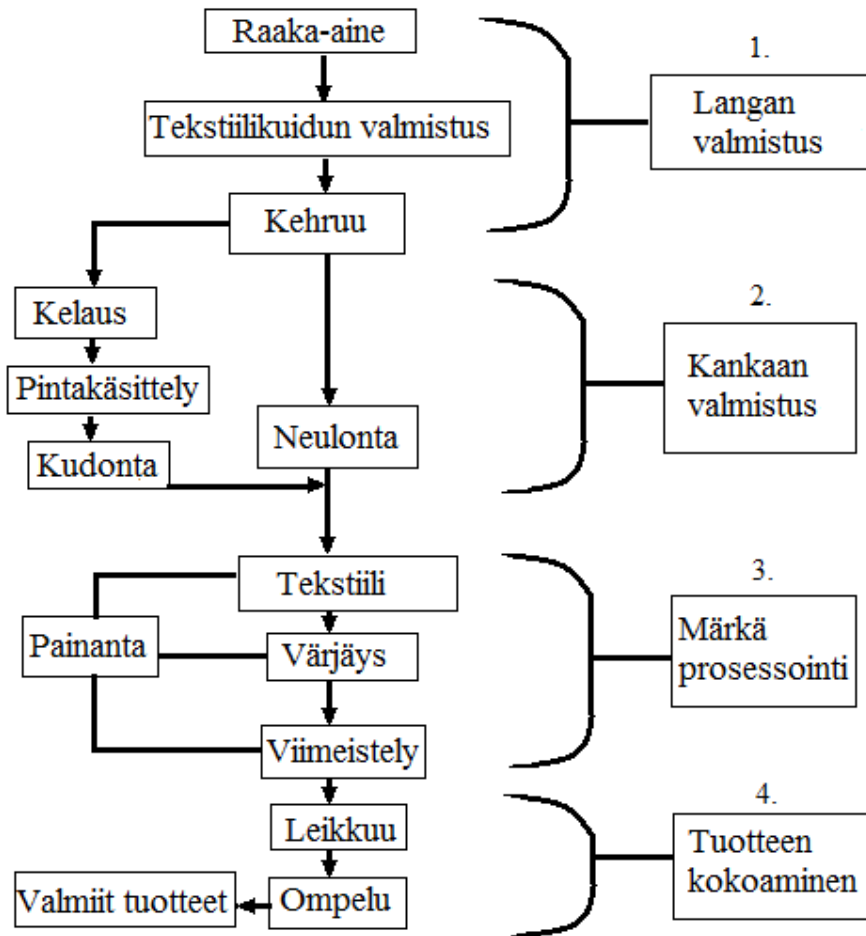
ADP	(Abiotic resource depletion) Uusiutumattomien luonnonvarojen loppuunkäyttämisen potentiaali
AP	(Acidification potential) Happamoitumisen potentiaali
BAT	(Best available technology) Tarkoittaa parasta teknologiaa, jota markkinoilla on
Bt	<i>Bacillus thuringiensis</i> on bakteeri, joka tuottaa tuholaisille myrkyllisiä proteiineja
CCA	(Cellulose carbamate) Selluloosakarbamaatti
CFC	(Chlorine-fluorine-carbon) Yhdisteet, jotka koostuvat kloorista, fluorista ja hiilestä
CML	Ohjelmisto, jolla voi mallintaa ympäristövaikutuksia
DBN	1,5-diatsabisyklo[4.3.0]non-5-eeni.
DDT	Diklooridifenyylitrikloorietaani
ekv.	Yhden aineen voi ilmaista toisen aineen ekvivalenttina perustuen moolimäärien tasapainoon.
EP	(Eutrophication potential) Rehevöitymisen potentiaali

EU	Euroopan Unioni
GM	(Genetically modified) Geneettisesti muokattu
GMO	(Genetically modified organism) Geneettisesti muokattu organismi, kuten kasvi, eliö tai bakteeri
GWP	(Global warming potential) Ilmaston lämpenemisen potentiaali
HAMK	Hämeen ammattikorkeakoulu
HCH	1,2,3,4,5,6-heksakloorisykloheksaani
HTPC	(Human toxicity potential carcinogens) Ihmiselle myrkyllisyyden potentiaali, joka viittaa syöpää aiheuttaviin kemikaaleihin
HTPNC	(Human toxicity potential non-carcinogens) Ihmisille myrkyllisyyden potentiaali, joka viittaa myrkyllisiin, mutta ei syöpää aiheuttaviin kemikaaleihin.
LCA	(Life cycle assessment) Elinkaariarviointi
LCI	(Life cycle inventory) Elinkaari-inventaari
LCIA	(Life cycle impact assessment) Elinkaaren ympäristövaikutusten arviointi
NMMO	<i>N-metyylimorfoliini-N</i> -oksidi
NPE	Nonyylifenolietoksyylaatti
ODP	(Ozone depletion potential) Otsoonikerroksen loppuunkäyttämisen potentiaali

odt	(Oven dry ton) Tuhat kiloa uunikuivattua puuta
PCP	1-(1-fenyylisykloheksyyli)piperidiini
PEF	(Product environmental footprint) Tuotteen ympäristöjalanjälki
PEFCR	(Product environmental footprint category rules) Ympäristöjalanjälkeä kuvaava malli, joka on kehitetty puuvilla T-paidalle
POCP	(Photochemical ozone creation potential) Valokemiallisen otsonin muodostumisen potentiaali
POP	(Persistent organic pollutants) Orgaaniset yhdisteet, jotka hajoavat hitaasti ympäristössä sekä kerääntyvät eliöihin
PVA	Polyvinyyliasetaatti
SYKE	Suomen ympäristökeskus
UFF	(U-landshjälp från folk till folk) Yhdistys, joka on erikoistunut vaatteiden sekä tavaroiden keräykseen, myyntiin ja ulkomaanavun tarjoamiseen
UV	Ultraviolettisäteily
wt, %	(Percentage by weight) Osuus painosta prosentteina
WMO	(World meteorological organization) Maailman meteorologinen organisaatio
WU	(Water use) Vedenkulutus

1 Johdanto

Muotiteollisuus luo uusia suuntauksia kiihtyvään tahtiin, mikä näkyy kuluttajakäyttäytymisessä. Vaatteista on tullut edullisempia verrattuna menneisiin vuosikymmeniin ja se on kannustanut kuluttajia ostamaan vaatteita entistä enemmän. Osa kierrätykseen päätyneistä vaatteista saattavat olla sellaisia, joita ei ole käytetty kertaakaan. Tekstiilien kasvaneesta tarpeesta johtuen tekstiilien raaka-aineiden kysyntä on lisääntynyt ja uusista materiaaleista on pula. Raaka-aineiden valmistuksen lisääminen rasittaa ympäristöä, koska tekstiilikuitujen valmistamiseen ja tekstiilin tuottamiseen liittyy paljon kemikaali- ja hiilidioksidipäästöjä. Luonnollisten tekstiilikuitujen valmistaminen rasittaa ympäristöä kuidun raaka-aineen viljelyn, kuidun kuljetuksen ja prosessoimisen osalta. Synteettisten tekstiilikuitujen ympäristörasite pohjautuu kuidun alkuperäiseen raaka-aineeseen, joka on öljy, ja synteettiset kuidut hajoavat hitaasti joutuessaan ympäristöön. Tekstiilikuitujen valmistuttua, ne käyvät läpi kuvan 1 mukaisen tekstiilinvalmistusprosessin, johon liittyy usein myös ympäristölle haitallisia ja myrkyllisiä kemikaaleja. Hyvinvointivaltioissa ympäristöä koskevat lait ovat tiukkoja ja tekstiiliprosessien jätevedet käsitellään siten, että ympäristörasite jää minimaaliseksi. Kehitysmaissa sen sijaan moni kemikaali pääsee vaikuttamaan ympäristöön haitaten alueen luonnollista ekosysteemiä. Suurimmat kemikaalipäästöt valmistusprosessissa johtuvat märkäprosessoinnista, johon kuuluu tekstiilin värjäys ja viimeistely. Muihin vaiheisiin, kuten langan-, kankaan- ja tuotteen valmistamiseen käytetään laitteita, jotka kuluttavat paljon sähköä. Sähkön alkuperä vaihtelee fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energialähteisiin.

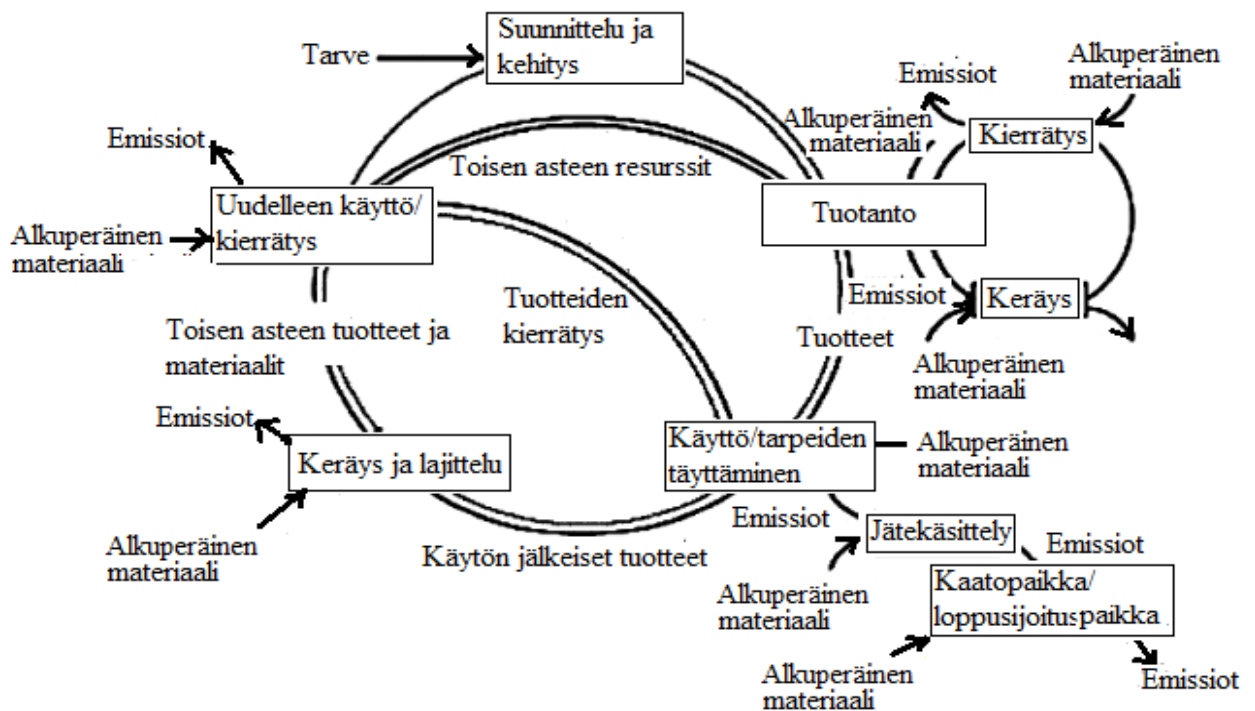


Kuva 1. Tekstiilin valmistusprosessi.

Vuonna 2016 voimaan astuneen lain mukaan poistotekstiilejä ei saa viedä enää kaatopaikalle. Tekstiilin kierrätyksen toivotaan tehostuvan uuden lain myötä ja poistotekstiilille kehitetään jatkuvasti uusia käyttötarkoituksia, kuten hyödyntämistä uuden tekstiilikuidun raaka-aineena. Poistoon päätyneiden tekstiilien materiaalit vaihtelevat tekokuiduista luonnonkuituihin. VTT on kehittänyt menetelmän, jolla puuvilla poistotekstiileistä voidaan valmistaa uutta tekstiilikuitua.^[1]

Aikaisemmin uudelleenkäyttöön kelpaamaton tekstiilijäte on hyödynnetty energiana. Samaan aikaan tekstiilijätteen lisääntyessä, on huomioitu, ettei puuvillan viljelyä voida enää lisätä kestäväen kehityksen näkökulmasta, sillä viljelymaata tarvitaan enemmän ravinnon tuottamiseen väestön kasvaessa^[2]. Kierrätyksen tehostaminen on avainasemassa päästöjen vähentämisessä. Tulevaisuudessa tulisi olla lajittelukeskuksia, joissa poistotekstiilit lajiteltaisiin kunnon ja materiaalin mukaan. Tekstiilien päädyttyä lajittelukeskukseen suurin osa

menee uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen. Uudelleenkäyttöön kelpaamattomasta tekstiilistä osa päätyisi mekaaniseen ja osa kemialliseen kierrätykseen. Vain kierrätysmateriaaleihin kelpaamaton tekstiili päätyisi jätteenpolttolaitokseen. Nämä kaikki kierrätyksen vaiheet aiheuttavat päästöjä, jotka vaikuttavat ympäristöön. Elinkaari-inventaarin (LCI) ja elinkaari-arvioinnin (LCA) kautta voidaan analysoida päästöjen määrä ja arvioida prosessista seuraavat ympäristövaikutukset. Kierrätyksen vaiheet on esitetty kuvassa 2. [3]



Kuva 2. Tekstiilin kierrätyksen vaiheet. Kuva on muokattu lähteestä [3].

Tässä pro gradu -tutkielmassa käsitellään LCI:n soveltamista tekstiilikuitujen elinkaarien tutkimiseen. Tutkimukseen liittyvässä kokeellisessa työssä tehdään LCI VTT:n kehittämälle selluloosakarbamaatti-prosessille. Kyseisessä prosessissa valmistetaan tekstiilikuitua selluloosasta, joka on peräisin poistopuuvillatekstiilistä. Tällöin poistotekstiilistä poistetaan ensin kaikki napit ja vetoketjut. Tämän jälkeen tekstiili jauhetaan hienommaksi. Poistopuuvillan kuidut sisältävät kemikaaleja ja väriaineita, jotka poistetaan valkaisemalla ja pesemällä. Puhdistetut kuidut käsitellään urealla, joka hajoaa kuumuudessa isosyaanihapoksi ja ammoniakiksi. Isosyaanihapo muodostaa esterin selluloosan hydroksyyliyhdyntien kanssa ja tätä yhdistettä kutsutaan selluloosakarbamaatiksi (CCA). Muodostunut CCA liuotetaan, suodatetaan ja kehrätään märkäkehrulla, jonka jälkeen valmis tekstiilikuitu katkotaan määrä-

mittaa ja lähetetään eteenpäin kehrättäväksi langaksi. LCI:ssa otetaan huomioon prosessiin liittyvät ympäristövaikutukset poistopuuvillatekstiilin lajittelusta valmiin tekstiilikuidun paalaukseen asti. Työn kokeellisessa osiossa CCA-kuidulle lasketaan LCI:n pohjalta ilmaston lämpenemisen potentiaali (GWP), joka ilmaistaan kiloina CO₂ ekv. tuotettua 1000 kg CCA-kuitua kohti. Muodostunutta GWP-arvoa verrataan puuvillaan ja viskoosiin.

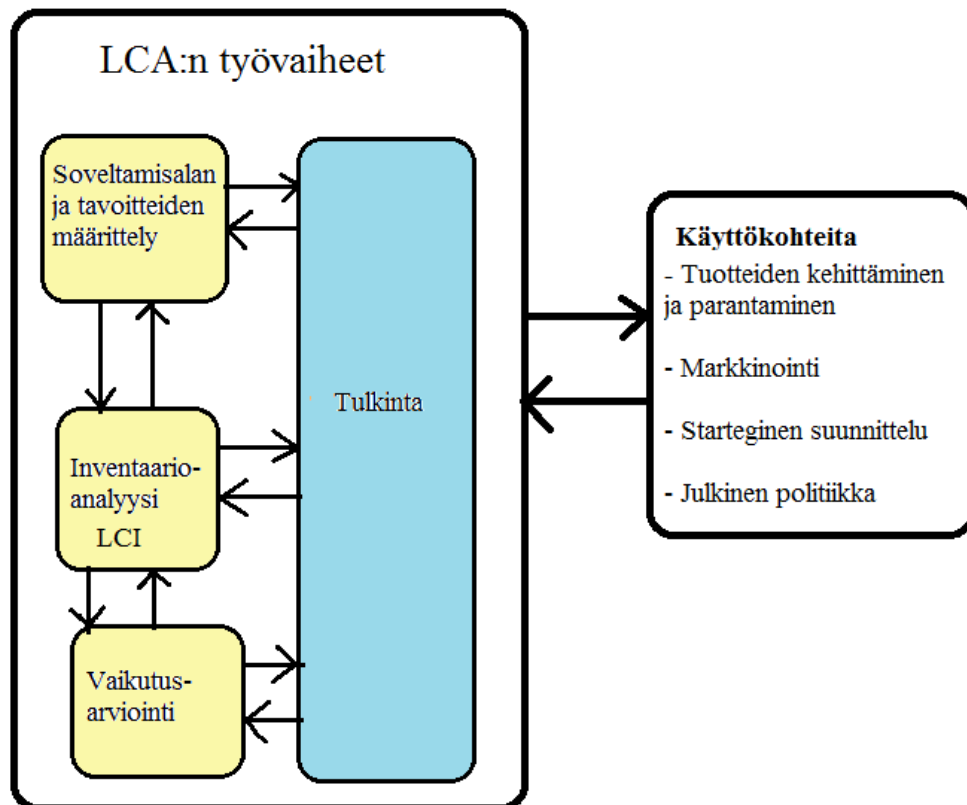
2 Elinkaaritaseen arvioiminen tekstiilikuiduille

Elinkaaritaseen avulla nähdään tuotejärjestelmän olennaiset syötteet ja tuotteet, joihin voidaan liittää niitä koskevat potentiaaliset ympäristövaikutukset LCA:ssa. LCI:n ja vaikutusarvioinnin tulkitsemisella voidaan seurata, ovatko tulokset tavoitteen mukaisia. LCA:ssa on otettava huomioon luonnonvarojen käyttö, ekologiset seuraukset ja ihmisten terveys. LCA-selvityksen tulisi esittää tuotejärjestelmien ympäristönäkökohdat kattavasti aina materiaalien hankinnasta loppukäsittelyyn ja jätteen loppusijoitukseen. Yksityiskohdat ja tarkasteluajanjaksot vaihtelevat riippuen tavoitteista sekä soveltamisalan määrittelystä. Selvityksessä menetelmien, tulosten, soveltamisalan, tietolähteiden, olettamusten ja lähtötietojen laadun kuvausten pitäisi olla avoimia sekä tietojen tulisi olla selkeästi esitettynä. LCA:n käyttötarkoitus on selvitettävä tutkimuksen alussa ja käyttöoikeuksiin sekä luottamuksellisuuteen liittyvistä ehdoista on sovittava. Menetelmänä LCA:n tulisi olla helposti muunnettavissa, jotta teknologian uudet tieteelliset tulokset ja parannukset voidaan ottaa huomioon. LCA:n tulosten tiivistämiselle yhteen kokonaiseen lukuarvoon tai tulokseen ei ole olemassa tieteellistä perustetta, koska järjestelmien elinkaaren eri vaiheisiin liittyy monimutkaisuutta ja monia vertailua vaikeuttavia tekijöitä. ^[4]

2.1 Yleistä

Kestävään kehitykseen tarvitaan metodeja, joilla voidaan mitata ja vertailla jonkin tuotteen valmistamiseen liittyviä ympäristövaikutuksia. Ympäristövaikutuksiin lasketaan tuotteen valmistamisesta aiheutuvat päästöt ja valmistamiseen käytetyt materiaalit sekä raaka-aineet,

jotka ovat peräisin ympäristöstä. Huomioon otetaan myös tuotteen kokoamisesta, käytöstä, kierrätyksestä ja lopullisesta sijoituspaikasta muodostuneet seuraukset. Päästöt ja luonnollisten resurssien käyttö aiheuttavat laajan kirjon seurauksia ilmastonlämpenemiseen ja muihin luontoa muokkaaviin tapahtumiin. LCA:ssa esitetään kattavasti tuotteen vaikutukset ympäristöön erilaisten indikaattoreiden ja ympäristönäkemyksen kautta, kuten tuotteen vaikutus ilmastonlämpenemiseen tai ympäristön happamoittamiseen. LCA:n avulla pyritään vaikuttamaan luonnon resurssien kulutuksen vähentämiseen ja emissioiden hallintaan. LCA sisältää neljä työvaihetta, joista ensimmäinen on soveltamisalan ja tavoitteiden määrittely, toinen on inventaarianalyysi LCI, kolmas on ympäristövaikutusarviointi LCIA ja neljäs tulosten tulkinta. LCA:n työvaiheet on esitetty kuvassa 3. ^[5]



Kuva 3. LCA:n työvaiheet. Kuva on muokattu lähteestä ^[4].

LCA-selvityksen soveltamisalan määrittelyssä on otettava huomioon toiminnallinen yksikkö, tuotejärjestelmän tai järjestelmien toiminnot, tuotejärjestelmän rajat, vaikutuslajit sekä sen tulkitsemisessa käytettävät menetelmät, allokoitimenettelyt, rajoitukset, tiedolle asetetut

vaatimukset, lähtötiedon laatuvaatimukset, selvityksessä vaadittavan raportin muoto sekä raportin tyyppi ja kriittisen arvioinnin tyyppi, mikäli suoritetaan kriittinen arviointi. Toiminnallinen yksikkö tarkoittaa tuotteiden suorituskyvyn mittayksikköä tuotejärjestelmässä. Toiminnallisen yksikön pääasiallinen tehtävä on antaa vertailuyksikkö, johon syötteitä ja tuotteita suhteutetaan. Tulosten vertailtavuus on tärkeää eri järjestelmien arvioinnissa. On saatava varmistettua se, että järjestelmien vertailut on tehty yhteisillä perusteilla. LCA:n rajat muodostuvat yksikköprosesseista, jotka otetaan mukaan tutkimukseen. Lähtöaineiden laatuvaatimusten pitää osoittaa lähtötietojen tarkkuus, täydellisyys ja edustettavuus. Lähtötiedoissa on myös määritettävä ajallinen, maantieteellinen sekä teknologinen kattavuus, LCA:ssa kokonaisuudessaan käytettävien menetelmien toistettavuus sekä johdonmukaisuus. Tietolähteiden ja menetelmien edustettavuus sekä tiedon epävarmuus on myös tuotava ilmi tutkimuksessa. Järjestelmien vertailussa on käytettävä samoja toiminnallisia yksiköitä ja yhdenmukaisiin menetelmiin liittyviä painotuksia esimerkiksi järjestelmän rajat, suorituskyky, allokointimenettelyt, tiedon laatu, syötteiden ja tuotteiden arviointiperusteet sekä vaikutusarviointi. Edellä mainittujen parametrien eroavaisuudet on tunnistettava ja raportoitava. Kriittisellä arvioinnilla todennetaan täyttääkö elinkaariselvitys kansainvälisen standardin vaatimukset lähtötietojen, menetelmätekniikan ja raportoinnin osalta. [4]

LCI:iin sisältyvät laskennan menettelytavat ja tiedonkeruu, jolla tuotejärjestelmään kuuluvat syötteet ja tuotteet saadaan määrälliseen muotoon. Syötteet ja tuotteet sisältävät informaation niihin liittyvien luonnonvarojen käytöstä sekä päästöistä maahan, ilmaan ja veteen. Näitä tietoja käytetään lähtötietoina LCIA:ssa. Tiedonkeruu ja laskennalliset menettelytavat vaihtelevat selvityksen kohteesta, yksikköprosessista ja soveltamisalasta riippuen. Laskennallisissa menettelytavoissa on otettava huomioon allokointimenetelmät. Allokointi tarkoittaa kierrätettävään tai kompleksissa toimivaan tuotteeseen liitettävää ympäristötaakkaa, joka on alkuperäisen tuotteen aiheuttama. Allokointimenetelmiä on monia ja niitä voidaan soveltaa esimerkiksi materiaali tai energiavirroissa. Allokointimenetelmien on oltava perusteltuja ja dokumentoituja. Energiavirtojen laskennassa on otettava huomioon erilaiset sähkölähteet, polttoaineet, sähkölähteen jakelun ja muuntamisen tehokkuus sekä energian tuottamiseen liittyvät syötteet ja tuotteet. [4]

LCIA:ssa lasketaan arvot erilaisille ympäristöindikaattoreille LCI:n tulosten pohjalta ja pohditaan potentiaalisten ympäristövaikutusten merkittävyyttä. Tähän työvaiheeseen saattaa liittyä iteratiivinen prosessi, jossa LCA:n soveltamisala ja tavoitteet tarkistetaan. Tarkistuksen avulla päätetään, onko selvityksen tavoitteet saavutettu. Tavoitteita ja soveltamisalaa muutetaan, jos iteratiivisessa prosessissa todetaan tavoitteiden olevan saavuttamattomissa. LCIA sisältää inventaaritiedon luokittelua ja mallintamista eri ympäristövaikutusluokkiin. Yleisesti hyväksytyjä menetelmiä inventaaritiedon yhdistämiseksi johdonmukaisesti johonkin tiettyyn ympäristövaikutukseen ei ole, koska vaikutusarviointiin sisältyy subjektiivisuutta. Subjektiivisuus ilmenee vaikutusluokkien mallintamisessa, valinnassa ja arvioinnissa. Tämän takia vaikutusarvioinnin avoimuus on tärkeä tekijä, jotta voidaan varmistaa olettamusten olevan selvästi kuvattuja ja raportoituja. ^[4]

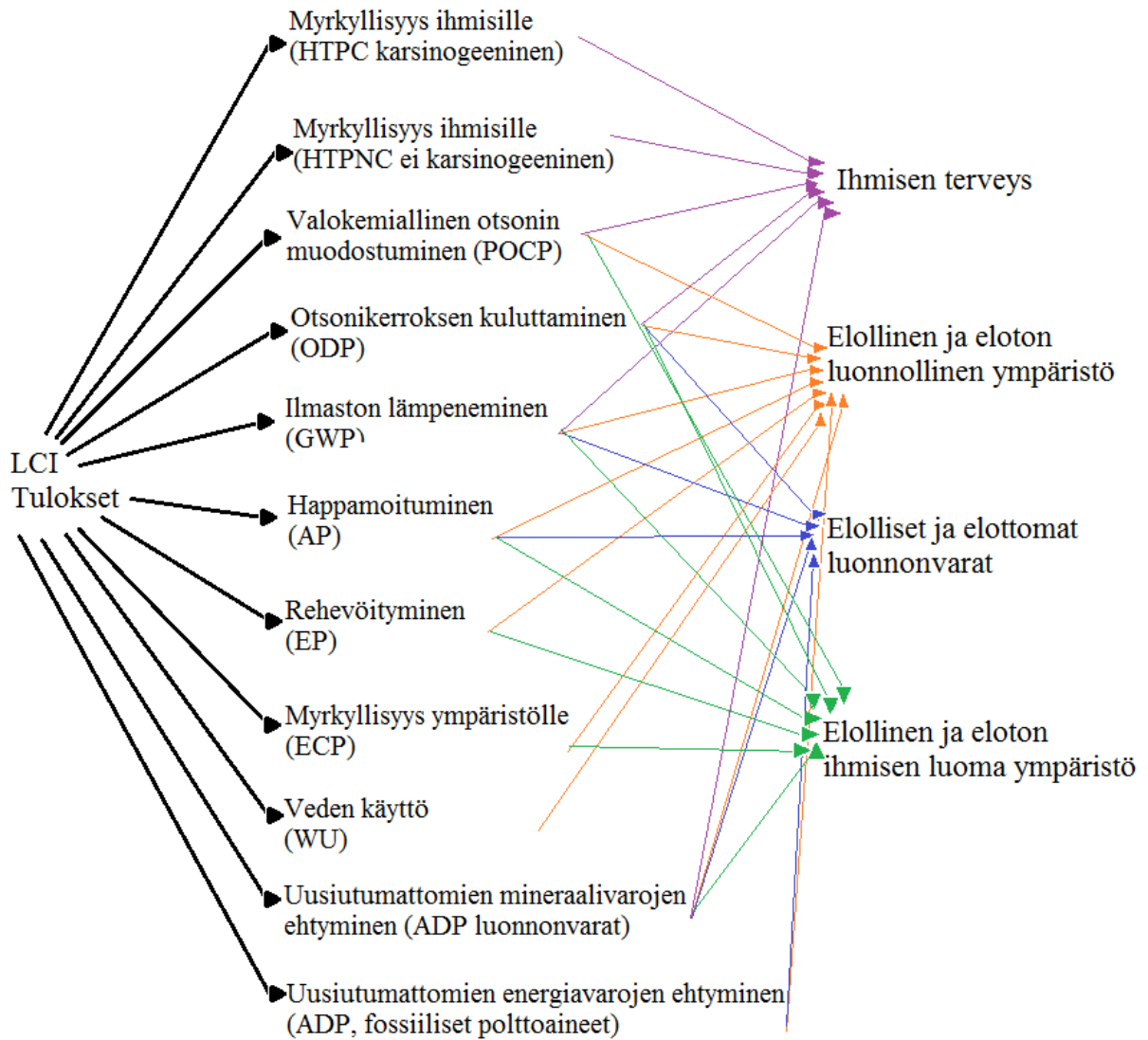
LCA:n tulosten tulkinta sisältää LCI:n ja LCIA:n, kun taas LCI sisältää ainoastaan inventaarin. LCI:n tulosten tulkinnassa voidaan myös tehdä iteratiivinen prosessi, jossa LCI:n soveltamisala tarkastetaan sekä kerätyn tiedon laatu arvioidaan suhteessa tavoitteisiin. Raportoinnissa LCA:n tulokset täytyy esittää kohdeyleisölle kokonaisuudessaan rehellisesti ja tarkasti. Kun elinkaariarvioinnin tulokset esitetään kolmannelle osapuolelle tai sidosryhmälle, raportti on laadittava selkeästi. Kolmannen osapuolen raportissa on oltava yleiset näkökohdat sisältäen LCA:n tekijän ja tilaajan, raportin päiväyksen, tavoitteiden soveltamisalan määrittelyn, LCI:n, LCIA:n, tulosten tulkinnan ja kriittisen arvioinnin. Vertailuväitteissä on mainittava materiaalivirta-analyysi, jossa on perusteltuna materiaalivirtojen poisjättäminen tai mukaan ottaminen. Kriittisessä arvioinnissa on esitettävä myös prosessin kuvaus, vertailtavien järjestelmien vastaavuudet, käytetyn tiedon tarkkuus ja edustettavuus. ^[4]

Kriittisessä arvioinnissa on varmistettava, että LCA:n menetelmät ovat yhdenmukaisia ja ne noudattavat kansainvälisiä standardeja. On otettava myös huomioon, että käytetyt menetelmät ovat teknisesti ja tieteellisesti päteviä, johtopäätökset ovat selvitysten ja rajoitteiden mukaisia ja selvityksen raportti on johdonmukainen. Kriittisen arvioinnin kriteerien myötä voidaan varmistaa, että tieto on luotettavaa. Tiedon avoimuus ehkäisee väärinymmärryksiä sidosryhmien kanssa. Kriittinen arviointi voidaan toteuttaa myös sisäisenä. Tällöin arvioinnin tekee yrityksen sisäinen asiantuntija, joka on riippumaton LCA-selvityksen toteuttamisesta. Arvioinnin suorittajalla täytyy olla tieteellinen ja tekninen asiantuntemus sekä hänen tulee olla tietoinen kansainvälisistä standardeista. LCA-selvityksen toteuttanut henkilö tekee

katselmusselonteon, jonka riippumaton asiantuntija tarkastaa. LCA:n raporttiin täytyy liittää katselmusselonteko, selvityksen tekijän kommentit ja katselmoijan suosituksiin laaditut kommentit. Selvityksen alkuperäinen tilaaja voi myös valita ulkoisen riippumattoman asiantuntijan toimimaan katselmuspaneelin puheenjohtajana. Puheenjohtaja valitsee paneeliin muut pätevät ja riippumattomat jäsenet katselmuksen tavoitteiden, budjetin ja soveltamisalan mukaan. Paneeliin voi kuulua sidosryhmiä, joihin elinkaariselvityksessä tehtävät johtopäätökset vaikuttavat. Tällaisia sidosryhmiä ovat esimerkiksi kilpailijat, viranomaiset ja kansalaisryhmät. Tällöin raporttiin täytyy liittää katselmusselonteko, asiantuntijan kommentit, katselmuspaneelin raportti sekä kaikki paneelin tai katselmoijan suosituksiin laaditut vastineet. ^[4]

2.2 Tekstiiliarvoketjun ympäristöindikaattorit

Tekstiiliteollisuuden toiminnasta aiheutuvia ympäristövaikutuksia tutkitaan LCIA:n eri ympäristövaikutusluokissa. Ympäristövaikutusluokat jaetaan keski- ja loppuvaiheen ympäristövaikutusluokkiin. Keskivaiheen ympäristövaikutusluokkia ovat ympäristöön liittyvät happamoituminen (AP), rehevöityminen (EP), ilmaston lämpeneminen (GWP), uusiutumattomien energiavarojen ehtyminen (ADP, fossiiliset polttoaineet), uusiutumattomien mineraalivarojen ehtyminen (ADP, luonnonvarat) ja valokemiallinen otsonin muodostuminen (POCP). Loppuvaiheen kategorioita ovat esimerkiksi ihmisen terveyteen liitetyt myrkyllisyys ihmisille (HTPC karsinogeeninen), myrkyllisyys ihmisille (HTPNC ei-karsinogeeninen) ja veden kulutus (WU) Ympäristövaikutusluokissa on omat karakterisointikertoimensa, jotka ilmaisevat kemikaalien päästöt indikaattorin avulla. Ympäristövaikutusluokat ovat esitetty kuvassa 4. ^[6]



Kuva 4. Ympäristövaikutusluokat. Kuva on muokattu lähteestä [7].

Ihmisille myrkylliset yhdisteet jaetaan *syöpää aiheuttaviin karsinogeenisiin yhdisteisiin (HTPC)* ja *ei-karsinogeenisiin yhdisteisiin (HTPNC)* [8]. Näiden ihmisille haitallisten kemikaalien vaikutusten punnitsemisessa on käytetty eri kemikaaleille määritettyjä riskikertoimia ja arvoja, jotka ovat mainittuina USA:n myrkyllisten päästöjen inventaarilistalla. Marginaalinen altistuskerroin merkitään symbolilla $H_{cn}(s_{cn} = 1)$ ja se lasketaan jokaiselle ihmiselle haitalliselle kemikaalille [9]. Kemikaaliannokselle ja sitä seuraavalle vapautumiselle lasketaan s_{cn} , joka ilmaisee annoksen 1 kg/päivä. Tämän jälkeen tutkittavan aineen H_{cn} normalisoidaan referenssiaineen marginaalisella altistuskertoimella sekä referenssikemikaalin ympäristöön vapautumisarviolla. Tällöin saadaan määrällinen arvo tutkittavalle aineelle HTP_{cn} . Lopullinen HTP-arvo lasketaan kertomalla jokainen vapautunut kemikaalipäästö ekvivalenssikertoimella. Ihmisille ja *ympäristölle myrkyllisten päästöjen (ECP)* arvoille

käytetään indikaattorina 1,4-diklooribentseeniä (1,4-DB ekv.); esimerkiksi, jos ihmisille suurena määränä myrkyllistä kuparia pääsisi 1000 kg ilmakehään, vesistöön ionina tai maalle, sen arvot ovat 4300 kg, 1,34 kg ja 1,25 kg 1,4-DB ekv. ^[10].

Valokemiallisen otsonin (POCP) muodostuminen tarkoittaa hapettimia, jotka muodostavat sumua. CML-vaikutusarviointimenetelmä käyttää referenssinä 1 kg eteeniä (C_2H_4); esimerkiksi 1 kg CH_4 :lla ja 1 kg SO_2 :lla ovat fotokemialliset hapetuskertoimet 0,006 ja 0,048 kg eteenin muodostumisessa. Muuntokuitujen POCP-arvot johtuvat pääasiassa SO_2 -päästöistä, jotka ovat peräisin sellunvalmistuksesta. ^[10]

Otsonikerroksen kuluttamisessa (ODP) otetaan huomioon yhdisteet, jotka aiheuttavat otsonikerroksen ohentumista. Tämä lisää UV-säteiden pääsyä maan pinnalle aiheuttaen erilaisia sairauksia, kuten melanoomaa. Maailman meteorologinen organisaatio (WMO) on kehittänyt mallin, jolla voi kuvata eri kaasujen aiheuttamaa otsonikerroksen ohentumista. Mallissa käytetään CFC-11 trikloorifluorimetaania (CFC-11) referenssiaineena. ODP ilmaistaan kg CFC-11 ekv.; esimerkiksi 1 kg bromitrifluorimetaani (Haloni 1301) ilmaistaan ODP-arvolla 12 kg CFC 11 ekv. ^[10]

Ilmaston lämpenemisen potentiaali sadassa vuodessa (GWP) on laskettu ilmaisemalla ilmaston muutokseen yhdistettyjen kemikaalien päästöt kg CO_2 ekv. CML-vaikutusarviointimenetelmällä. Yhdisteillä on eri kertoimet suhteessa hiilidioksidin aiheuttamaan ilmastonmuutokseen. Esimerkiksi CH_4 :n ja CO_2 :n arvioidaan vaikuttavan ilmastonmuutokseen eri voimakkuuksilla ja niiden suhde on 1:25. Tällöin 1 kg metaania ilmaistaan 25 kg CO_2 ekv. ^[10]

Yhdisteiden epäillään edesauttavan *happamoitumista (AP)* jos ne vapauttavat SO_2 ja NO_x yhdisteitä ilmaan. Rikin ja typenoksidit voivat muuttua rikki- ja typpihapoiksi vedessä. Rikki- ja typpihappo päätyvät vesistöihin sadeveden mukana ja vaikuttavat ympäristöön sekä sen eläimiin. Kaikki kemikaalit, joiden katsotaan happamoittavan ympäristöä ilmaistaan kg SO_2 . AP-arvon ollessa yli 1 tutkittava yhdiste on voimakkaampi kuin SO_2 , sillä se vapauttaa enemmän happoa ympäristöön. ^[11]

Rehevöityminen (EP) tapahtuu ylimääräisten typpi- ja fosforiyhdisteiden päädyttyä vesistöön ja maalle ^[11]. Nämä liikaravinteet edesauttavat biomassan kasvua ja biomassan lisääntyminen voi vaikuttaa vallitsevan ekosysteemin tasapainoon. Rehevöitymisen referenssi kg PO_4^{3-} toimii indikaattorina ympäristöön pääseville ravinteille ^[10].

Veden kulutusta (WU) kutsutaan niin sanotuksi virtuaaliseksi vedeksi, kun puhutaan teollisen prosessin vesitaseen laskemisesta. Veden kulutus ilmaistaan prosessin tarvitsemana vetenä yksikössä m^3 esimerkiksi 1000 kg valmistettua tuotetta kohti. ^[12]

Fossiilisten polttoaineiden ja epäorgaanisten luonnonvarojen ehdyttäminen (ADP) viittaa epäorgaanisten polttoaineiden käyttöön, kuten kupariin, öljyyn kaasuun tai hiileen. Indikaattorina käytetään antimonia (Sb). Muut mineraalit ja energialähteet on muunnettu kg Sb ekv. mukaan. Aineiden määrät mooleina on asetettu samanarvoisiksi indikaattorin kanssa; esimerkiksi 1 kg kuparia on 0,00194 kg Sb ekv. ^[10]

2.3 Kierrätetyn puuvillan allokointi

Inventaarianalyysin avulla voidaan yhdistää tuotejärjestelmän yksikköprosessit energia- ja materiaalivirroilla. Monet teollisuusprosessit tuottavat useampaa kuin yhtä tuotetta sekä kierrättävät välivalmisteita tai hylättyä tuotetta raaka-aineenaan. Tämän vuoksi energia- ja materiaalivirrat sekä niiden päästöt ympäristöön on allokoitava eri tuotteille selvästi ilmaistujen menettelyjen mukaisesti. Allokoinnin periaatteisiin kuuluu se, että selvityksen pitää tunnistaa yhteiset prosessit tuotejärjestelmien kanssa. Herkkyysanalyysi on toteutettava, jos useampi allokointimetodi vaikuttaa sovelialta. Yksikköprosessien syötteiden ja tuotteiden allokointiin käytetty menettely on perusteltava ja dokumentoitava tarkasti. Allokointi menetelmiä voi tarkastella kolmen vaiheen kautta. ^[13]

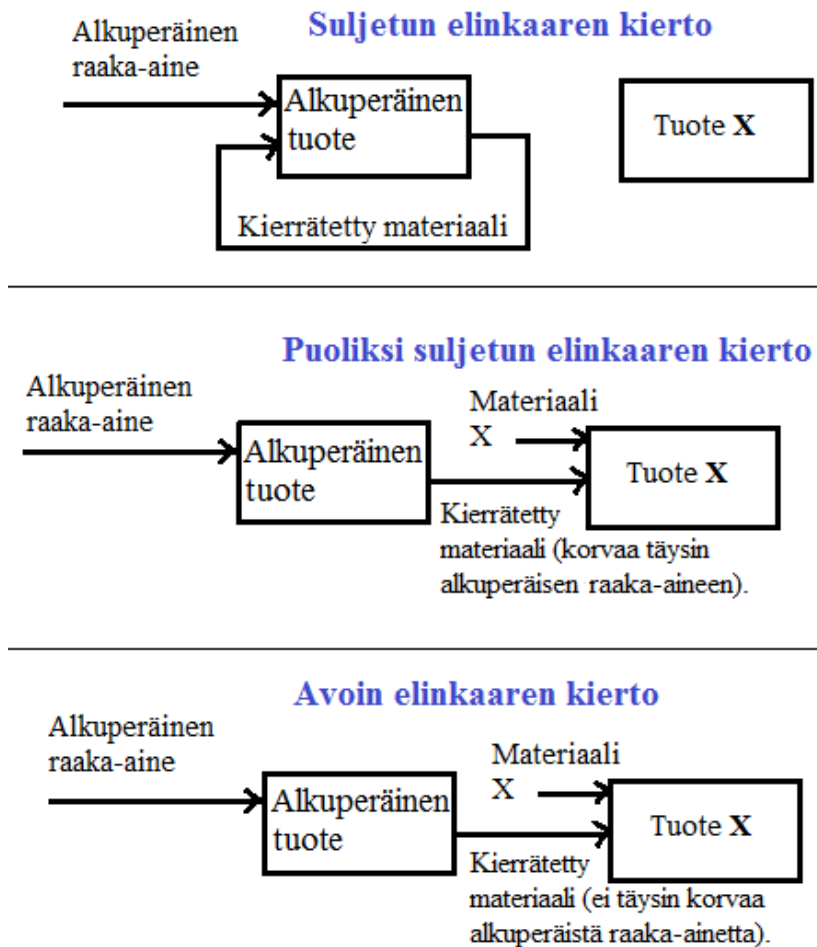
1. Allokointia tulisi välttää mahdollisuuksien mukaan. Välttäminen onnistuu jakamalla allokoitava yksikköprosessi kahteen tai useampaan alaproessiin ja niihin kerätään

syöte- ja tuotetiedot tai laajentamalla tutkimuksen rajoja kattamaan lisätoiminnat, jotka liittyvät tuotejärjestelmän lisätoimintoihin. ^[13]

2. Mikäli allokointia ei voida välttää, järjestelmän syötteet ja tuotteet tulisi osittaa järjestelmän eri toimintojen ja tuotteiden välillä siten, että tulee ilmi miten toimintojen ja järjestelmän tuottamien tuotteiden määrälliset muutokset vaikuttavat syötteisiin ja sitä kautta tuloksiin ^[13].

3. Otetaan huomioon, että mikäli allokoinnin perustaksi ei voida asettaa fysikaalisia suhteita, syötteet on allokoitava toimintojen tuotteiden välillä käyttäen muita suhteita. Tuote- ja syötetietoja voidaan allokoida rinnakkaistuotteiden välillä tuotteiden taloudellisen arvon perusteella. Tietyt tuotteet voivat olla osaksi rinnakkaistuotetta ja jätettä. Tällöin rinnakkaistuotteen ja jätteenvälinen suhde on tunnistettava, koska syötteet ja tuotteet allokoidaan vain rinnakkaistuotteelle. ^[13]

Allokaatiometodeja on useita ja ne valitaan tutkittavalle tuotteelle elinkaaren kierron avoimuuden perusteella. Kierrätystuotteen elinkaaren voi jakaa suljettuun kiertoon, avoimeen kiertoon ja puoliksi suljettuun kiertoon. Materiaalin elämänkaari määritellään suljetuksi, kun kierrätystuotteen ominaisuudet eivät muutu alkuperäiseen materiaaliin verrattuna. Tällaista kiertoa kuvastaa vaatteiden uudelleenkäyttö. Uudelleenkäyttöön otettujen vaatteiden rakenne ei muutu uudessa elinkaarensa, ne vain vaihtavat omistajaa. Avoin elinkaari tarkoittaa, että kierrätysmateriaali käy läpi täysin uuden prosessin ja sen rakenne tai koostumus muuttuu erilaiseksi kuin alkuperäinen tuote. Avoimeen elinkaareen liitetään myös laadun huononeminen, koska kierrätetyn materiaalin rakenne on harvemmin yhtä vahva kuin alkuperäisen tuotteen. Puolisuljetun elinkaaren katsotaan koskevan kierrätystuotteita, jotka käyvät läpi eri prosessin kuin alkuperäinen tuote, mutta kierrätystuotteen alkuperäiset ominaisuudet eivät muutu olennaisesti laadun suhteen. Usein alkuperäistä materiaalia joudutaan lisäämään kierrätysmateriaalin joukkoon, jotta tuotteen laatu ei muutu ja kierto voitaisiin määritellä suljetuksi. Monet LCA:n harjoittajat määrittelevät puoliksi suljetun kierron määritelmään sopivan kierrätystuotteen suljetun kierron tuotteeksi. Kolme edellä mainittua elinkaarta on esitetty kuvassa 5. ^[14]

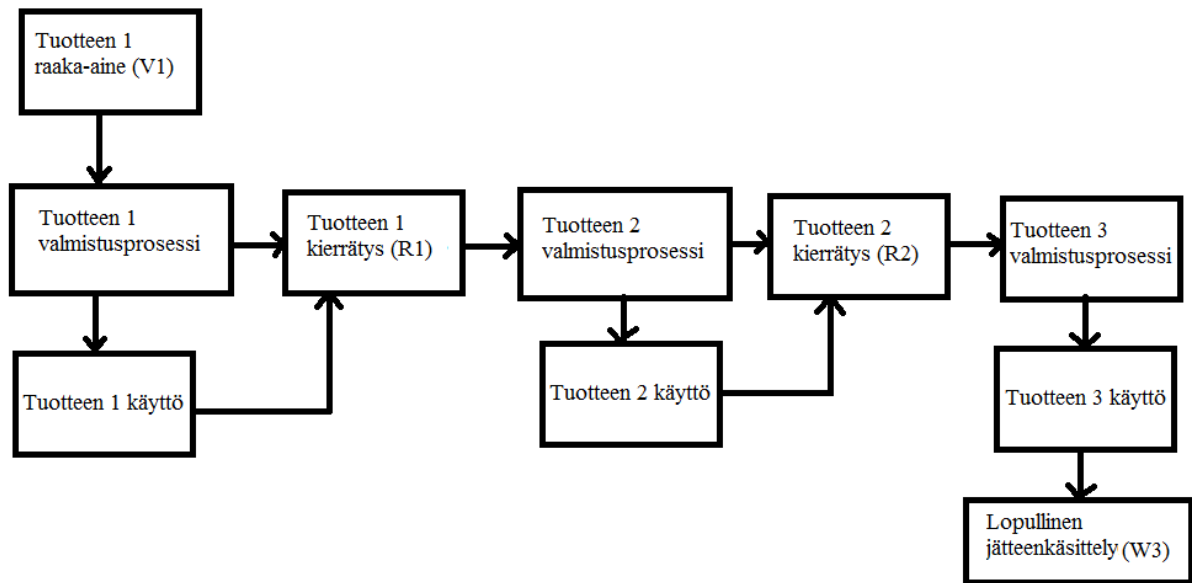


Kuva 5. Kierrätetyn tuotteen elinkaarikierrot. Kuva on muokattu lähteestä ^[14].

Suosituimpia tapoja yhdistää alkuperäinen materiaali kierrätysmateriaaliin ovat cut-off-metodi, tutkimuksen rajojen laajentaminen, taloudellinen allokaatio, syötettyyn materiaaliin keskittynyt allokaatio, tuotteeseen keskittynyt allokaatio, arvoa korjaava allokaatio ja usean kierrätysmetodin allokaatio. Cut-off-metodi on yksinkertaisin allokaatiometodeista, koska siinä liitetään tutkittavan kierrätystuotteen päästöt ja ympäristövaikutukset suoraan tutkittavaan tuotteeseen, eikä elinkaaren ulkopuolista tietoa tarvita. Tutkimuksen rajojen laajentamisessa kierrätetyn tuotteen elinkaaren rajojen sisäpuolelle lisätään myös alkuperäisen tuotteen tuotanto sekä jätteenkäsittely kaikille mukana oleville prosesseille, jotta elinkaaren kierron voidaan ajatella olevan suljettu. Taloudellinen allokaatio perustuu kierrätysprosessiin syötettyjen ja kierrätysprosessissa tuotettujen materiaalien markkinahintoihin. Syötettyyn materiaaliin keskittynyt allokaatiometodi ottaa huomioon vain alkuperäisen materiaalin ja kierrätysmateriaaliin syötetyt raaka-aineet sekä kierrätysmateriaalin keräyksen ja sitä seuraavat vaiheet aina jätteenkäsittelyyn asti. Menetelmä on melko samanlainen cut-off-metodin kanssa. Tuotokeskeinen allokaatiometodi perustuu alkuperäisen raaka-aineen korvaa-

miseen. Tämän metodin tarkoitus on osoittaa, miten kierrätystuote korvaisi täysin alkuperäisen materiaalin ja minkälaisia vaikutuksia sillä olisi ympäristöön. Arvoa korjaavassa allokaatiossa otetaan huomioon, että kierrätystuotteen laatu ja käyttötarkoitus voi olla eriävä alkuperäisestä tuotteesta. Tällöin kierrätystuotteen markkinahintaa verrataan alkuperäisen tuotteen markkinahintaan ja verrataan tuotteiden eriäviä ominaisuuksia. Usean kierrätysmetodin allokaatiossa kuvataan alkuperäisen tuotteen ja kierrätystuotteen elinkaaret siten, että alkuperäinen tuote tarjoaa raaka-aineen kierrätystuotteelle. Tässä metodissa käytetään viittä eri parametria kuvastamaan prosessien toimivuutta. Käytetyt parametrit ovat palautusaste, palautusprosessin saanto, alkuperäisen tuotteen vaikutus, kierrätystuotteen vaikutus ja elinkaarien määrää. ^[14]

Nicholson et al. ^[6] esittävät laskukaavat viidelle eri allokaatiometodille, joita voi käyttää kierrätystuotteiden ympäristötaakan määrittämisessä. Laskukaavat ovat määritelty cut-off-metodille, laadun heikkenemistä kuvaavalle metodille, suljetun elinkaaren metodille, 50/50-metodille ja substituutiometodille. Kaavoja sovelletaan tilanteeseen, joka on esitetty kuvassa 6. Ensimmäisen tuotteen aiheuttamat ympäristövaikutukset on jaettu raaka-aineen hankkimiseen, valmistusprosessiin, tuotteen käyttöön ja kierrätykseen. Kierrätetyn tuotteen ympäristövaikutukset on jaettu kierrätystuotteen valmistusprosessiin, tuotteen käyttöön ja kierrätykseen. Kolmannen tuotteen ympäristövaikutukset on puolestaan jaettu kolmannen tuotteen valmistusprosessiin, tuotteen käyttöön ja lopullisten jätteiden käsittelyyn. ^[6]



Kuva 6. Kolmen tuotteen yhdistäminen. Kuva on muokattu lähteestä [6].

Cut-off-metodissa L1 osoittaa tuotteeseen 1 kohdistuvan elinkaari- ja taakan, V1 ilmaisee ensimmäisen materiaalin elinkaaren aiheuttaman taakan alkuperäiselle tuotteelle L1. Ensimmäisen tuotteen kierrätyksestä syntyvää taakkaa kuvastaa R1, joka liitetään tuotteeseen 2 (L2). Toisen tuotteen kierrätystaakkaa R2 liitetään tuotteeseen 3 (L3), joka on myös vastuussa viimeisestä jäte- ja taakan käsittelystä W3. Kaavoissa 1, 2 ja 3 käsitellään elinkaari- ja taakan jakoa 3:n tuotteen kesken. Ensimmäisen tuotteen elinkaari- ja taakkaan lisätään vaiheet raaka-aineista tuotteen käyttöön asti. Toiseen tuotteeseen on lisätty osa ensimmäisen tuotteen elinkaari- ja taakkaa ja kierrätyksestä R1 koitunut ympäristö- ja taakan rasite. [6]

$$L1 = V1 \quad (\text{kaava 1})$$

$$L2 = R1 \quad (\text{kaava 2})$$

$$L3 = R2+W3 \quad (\text{kaava 3})$$

Laadun heikkenemistä kuvastava metodi perustuu sille ajatukselle, että alkuperäisen tuotteen valmistus ja viimeisen tuotteen loppukäsittely ovat välttämättömiä vaiheita tutkitun kierrätystuotteen valmistamiseksi. Alkuperäisen materiaalin laatu heikkenee kierrätyksessä ja siksi kierrätysmateriaaliin täytyy lisätä alkuperäistä tuotetta laadun parantamiseksi. Laadun heikkenemistä voidaan kuvata kaavalla 4, jossa Q_i kuvaa materiaalin laatua, n kuvaa

elinkaarien määrää ja R on alkuperäisen materiaalin määrä, joka tarvitaan parantamaan kierrätystuotteen laatua. ^[6]

$$\frac{Q_i}{\sum_{i=1}^{Q_i} Q_i} = (V1 + R1 + R2 + W3) \quad (\text{kaava 4})$$

Suljetun elinkaaren metodissa oletetaan, että jokainen tuote on tasapuolisesti vastuussa ympäristöön kohdistuvista vaikutuksista, joita alkuperäinen materiaali aiheuttaa. Mukaan lasketaan alkuperäisen materiaalin valmistusprosessi, kierrätys ja lopullinen jätteen käsittely. Suljetun elinkaaren kierron voi laskea kaavalla 5. ^[6]

$$L1 = L2 = L3 = \frac{V1 + (R1 + R2) + W3}{n} \quad (\text{kaava 5})$$

Metodin *50/50* mukaan alkuperäisen materiaalin valmistusprosessista ja jätteen käsittelystä aiheutunut ympäristötaakka jaetaan tasan alkuperäisen tuotteen valmistusprosessin ja jätteen käsittelyn kesken, koska ne ovat välttämättömät kierrätystuotteen valmistuksen ja käytön kannalta. Metodi *50/50* lasketaan kaavoilla 6, 7 ja 8. ^[6]

$$L1 = \frac{V1+R1+W3}{n-1} \quad (\text{kaava 6})$$

$$L2 = \frac{R1+R2}{n-1} \quad (\text{kaava 7})$$

$$L3 = \frac{V1 + R2 + W3}{n-1} \quad (\text{kaava 8})$$

Substituutiometodia voidaan käyttää kierrätystuotteelle, joka korvaa täysin alkuperäisen tuotteen. Jokaisen tuotteen aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat samat ($L1 = L2 = L3$) ja ne vastaavat alkuperäisen tuotteen aiheuttamia ympäristövaikutuksia, kun alkuperäistä tuotetta lisätään kierrätetyn tuotteen joukkoon laadun parantamiseksi. Lisäksi kierrätetyn tuotteen aiheuttamat ympäristövaikutukset on suunnattava kierrätettyyn tuotteeseen. Substituutiometodin voi laskea kaavalla 9. ^[6]

$$L1 = (100 \% - r \%)(R1) + r \% (V1 + W3) \quad (\text{kaava 9})$$

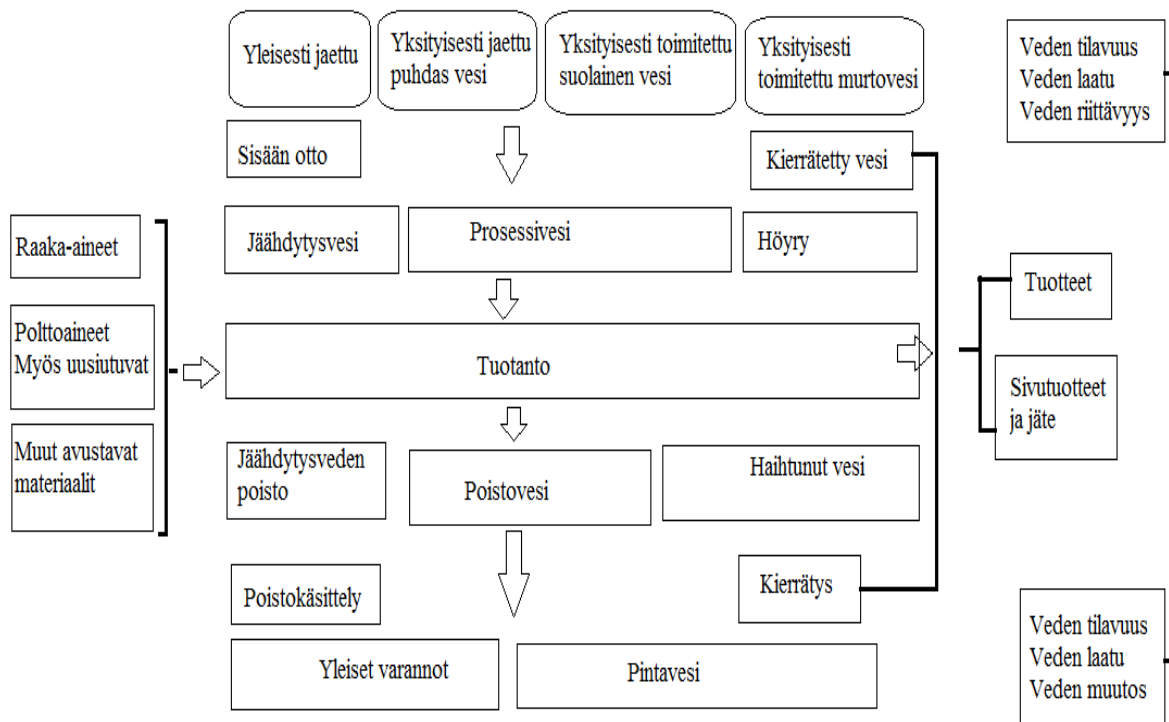
2.4 Vesijalanjäljen määrittäminen tekstiilikuidulle

Monet tekstiilialan yritykset ovat asettaneet uudeksi tavoitteekseen uudistaa prosessiaan ympäristöystävällisemmäksi veden ja energian kulutuksen osalta ^[15]. Tekstiiliteollisuudessa erityisesti tekstiilin märkäprosessointi on yksi suurimpia veden kuluttajia ja myös yksi suurin teollisen jäteveden tuottaja. Jätevedessä esiintyy kemikaaleja, jotka ovat osallistuneet tekstiilin prosessoinnin eri vaiheisiin, kuten esikäsittelyyn, värjäykseen, painatukseen ja viimeistelyyn. Tämän vuoksi poistovesi sisältää monia myrkyllisiä kemikaaleja, jotka voivat aiheuttaa mittavia haittoja ympäristössä. Jotta yritykset säästäisivät resursseja ja pysyisivät kilpailukykyisinä, niiden on säästettävä veden kulutuksessa ja osoitettava, että ympäristöhaittojen vähentämiseen on sitouduttu. Yritysten on tarjottava myös hyvä seloste tutkittavan prosessin vedenkulutuksesta ja märkäprosessien poistoveden saasteista. Tekstiiliteollisuudessa puhdasta vettä käyttävät eniten filamentointi, liottaminen, tärkkäys, puhdistaminen, kutistaminen, valkaisu, merserointi, värjäys, pesu, neutralointi ja suolakylpyprosessit ^[16].

Vesijalanjäljen mallintamista kehitetään jatkuvasti, jotta se antaisi mahdollisimman realistisen kuvan paikallisesti tapahtuvaan puhtaan veden käyttöön. Aikaisemman vesijalanjäljen määrittämisessä on käytetty mallia, jossa maailman vesivarannot luokitellaan uusiutuvaksi luonnonvaraksi ja systeemi määritellään suljetuksi kierroksi. Kyseisessä mallissa esitetään veden kulutus tilavuuden suhteen ja tilavuutta verrataan maailman vesivarantoihin. Tällä aikaisemmalla vesijalanjäljen mallilla on ollut vaikeampi hahmottaa yritysten toiminnasta

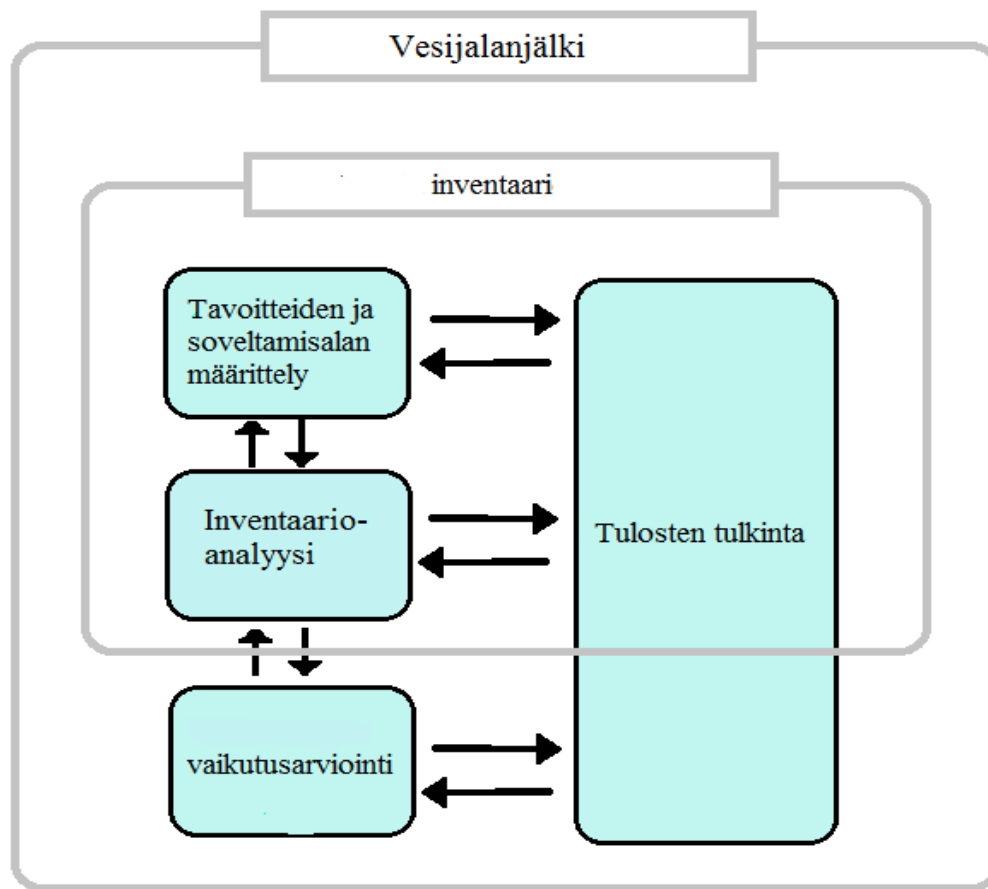
johtuvaa paikallista vedenkulutusta ja jätevesien päästöjä. Mallissa vesi luokitellaan kolmeen eri ryhmään; vihreään vesijalanjälkeen $WF_{\text{vihreä}}$, siniseen vesijalanjälkeen WF_{sininen} ja harmaaseen vesijalanjälkeen WF_{harmaa} . Vihreä vesijalanjälki viittaa tuotantoketjussa haihtuneeseen tai tuotteisiin sitoutuneeseen veteen ja sininen vesijalanjälki ilmaisee puhtaan pinta- ja pohjaveden kulutuksen. Harmaa vesijalanjälki viittaa tehtaiden poistovesiin ja siinä lasketaan, kuinka paljon tarvitaan puhdasta (WF_{sininen}) vettä, jotta saadaan tuotannosta tulevien saasteiden määrä laimennettua sopivalle vedenlaadun tasolle ennen ympäristöön laskemista. ^[17]

Uudessa vesijalanjäljen mallintamisessa käytetään standardia ISO14046:2014(E), jossa otetaan huomioon ympäristön olosuhteet perustuen yrityksen sijaintiin ja veden laatuun. Standardoinnissa vesijalanjäljen määrittäminen voidaan kuvata kolmena eri tasona. Ensimmäinen taso sisältää vedenkulutuksen inventaarin, muttei vaikutusarviointia. Toiseen tasoon on määritelty yksinkertaistettu vesijalanjälki, jossa arvioidaan veden kulutusta paikallisesti ja pohditaan tarkasteltavan systeemin vaikutuksia rehevöitymiseen, otsonikerroksen ohentamiseen ja muihin ympäristökategorioihin. Kolmas taso sisältää kattavan vesijalanjäljen, johon kuuluu useita vaikutusindikaattoreita. Tätä voi käyttää tutkimustyökaluna sekä vertailla eri yritysten tuotteita keskenään. Tekstiiliteollisuudelle on kehitetty oma systeemi vesijalanjäljen mallintamiseen. Tekstiiliteollisuuden vesijalanjäljen mallintaminen on esitetty kuvassa 7. ^[18]



Kuva 7. Tekstiiliteollisuuden vesijalanjäljen mallinnus. Kuva on muokattu lähteestä ^[18].

Standardi ISO14046:2014(E) kattaa kaikki ympäristöä koskettavat näkökulmat, kuten ihmisten terveyden ja vesivaroit, joihin kuuluvat veden saatavuus ja saastuminen. Vesijalanjäljen määrittämisessä on kolme työvaihetta, kuten LCA:ssa, mutta työvaiheissa käsitellään ainoastaan veteen liittyvää informaatiota. Ensimmäisessä työvaiheessa määritetään soveltamisala ja tavoitteet, toisessa vaiheessa lasketaan inventaari ja kolmannessa vaiheessa tehdään vaikutusarviointi inventaarin pohjalta. Kuvassa 8 on esitetty vesijalanjäljen määrittämisen eri työvaiheet. Inventaarin tulokset voidaan esittää tutkimuksessa, mutta sitä ei kutsuta siinä tapauksessa vesijalanjäljeksi. Vesijalanjälki sisältää laajan vaikutusarvioinnin, joka esitetään standardin ISO 14046 mukaan. Vaikutusarvioinnissa on esitettävä kaikki mahdolliset prosessin potentiaaliset vaikutukset vesistöön eri vaikutuskategorioiden kautta. Tiedon puuttuminen ei ole oikeuttava tekijä minkään kategorian tulkitsematta jättämiseen. Suppea vaikutusarvio vedelle raportoidaan vesijalanjäljen tarkenteena, joka sisältää vaikutusarvioinnin, veden käytettävyyden jäänjäljen, veden niukkuusjäänjälki, veden rehevöitymisjäänjäljen, veden ympäristömyrkyjäänjäljen, veden happamoitumisjäänjäljen ja suppean vesijäänjäljen. ^[19]



Kuva 8. Vesijalanjäljen työvaiheet. Kuva on muokattu lähteestä ^[19].

Tavoitteiden määrittämisessä on esitettävä valittu menetelmä, tutkimuksen tarkoitus, kohderyhmä kenelle tulokset laaditaan ja onko tutkimus yksistään vaikutusarvio vai osa elinkaariarviota. Tutkimuksen soveltamisalan määrittämisessä on esitettävä tutkitun systeemin rajat, mitä jätetään tutkimuksen ulkopuolelle ja miten se perustellaan, epävarmuustekijät ja rajoitukset, saatu tieto ja tiedon laatuvaatimukset, lähtötilanne mihin verrataan tutkitun systeemin vaikutusta, käytetyt yksiköt sekä allokatio ja perustelut valitulle allokatiometodille. ^[19]

Inventaarianalyysin laskutoimitukset seuraavat standardin ISO14046:2014(E) vaatimuksia. Laskuissa on selitettävä tarkasti oletukset ja jokainen laskutoimitus on osoitettava selkeästi. Jokaisen yksikköprosessin virtaus on osoitettava ja esitettävä prosessiin virtaavan ja ulos tulevan veden määrä. On oltava huolellinen sisään ja ulos virtaavan veden suhteen, että näistä kerätty tieto noudattaa tutkimuksen tavoitteita. Mukana olevan tiedon on perustuttava

herkkyysanalyysiin, joka osoittaa tiedon merkittävyyden ja vahvistaa näin systeemin alkuperäisten rajojen paikkansapitävyyden. Herkkyysanalyysi voi johtaa yksikköprosessien sekä sisään ja ulos tulevien vesimassojen ulosrajaamiseen, mikäli ei voida osoittaa tiedon merkittävyyttä. Lisäksi rajojen sisäpuolelle saatetaan asettaa uusia yksikköprosesseja, joiden sisään ja ulostulovesien katsotaan olevan merkityksellinen. Vaikutusarvioinnissa käytetään inventaarista saatua tietoa ja sen perusteella ilmaistaan ympäristövaikutukset veteen yhden tai useamman ympäristöindikaattorin avulla. Tulosten tulkinnassa vesijalanjäljessä on tunnistettava vesistöihin vaikuttavat tekijät ja laskujen on avustettava niiden tekijöiden osoittamisessa. On myös esitettävä arvio, jossa on ilmaistuna tutkimuksen laajuus, herkkyys ja johdonmukaisuus. Lisäksi on osoitettava vesijalanjäljen rajoitukset, epävarmuustekijät ja yhteenveto.^[19]

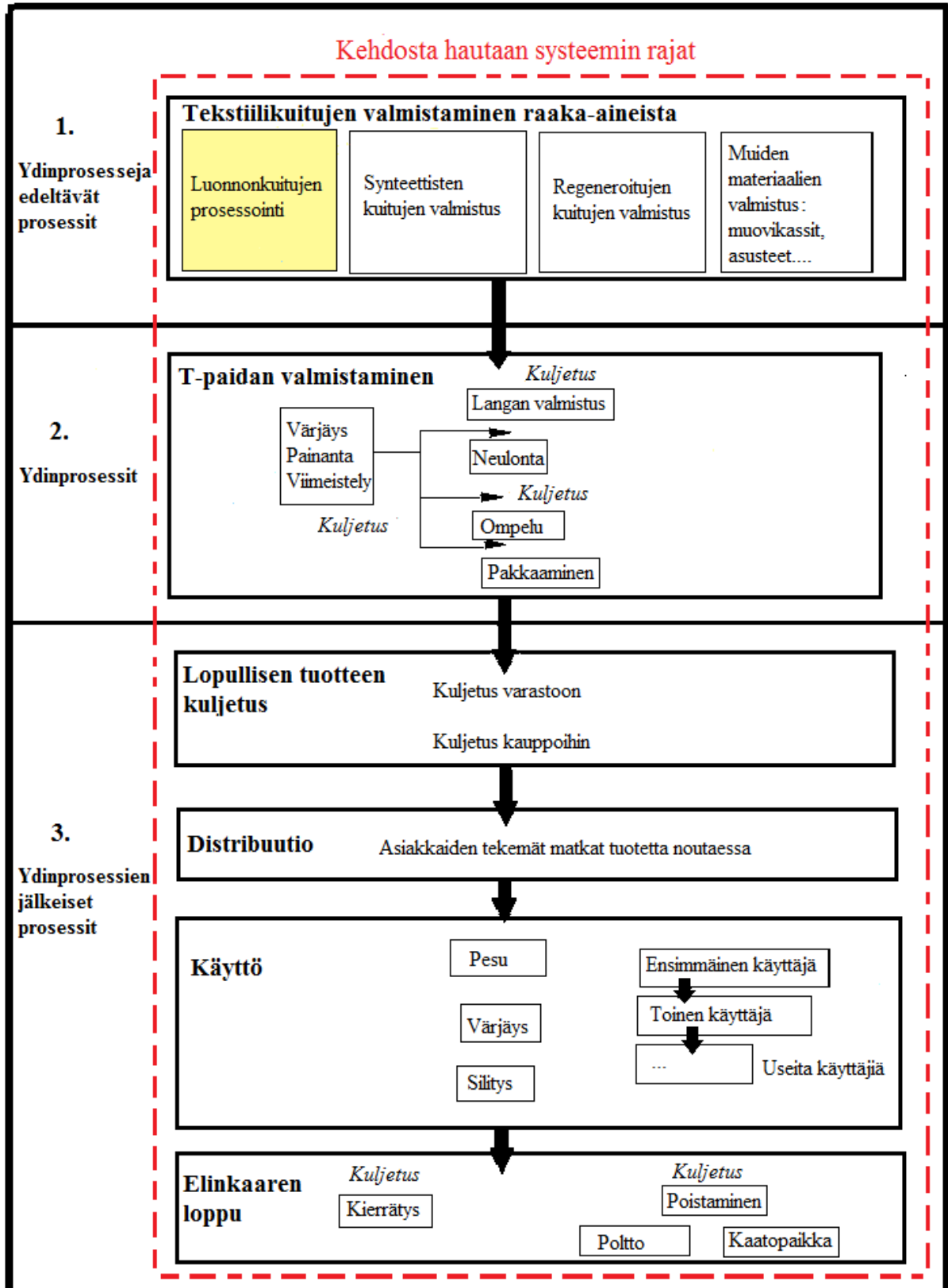
2.5 LCA-mallinnus tekstiilituotteille

Tekstiiliteollisuuteen kehitetään parhaillaan uusia LCA-malleja kuvaamaan vaatekappaleiden kokonaisvaltaista elinkaarta, joka sisältää vaiheet raaka-aineiden tuottamisesta aina loppusijoituspaikkaan. Tavallisesti tekstiilituotteita koskeneet LCA-selvitykset on tehty 1000 kg valmista tekstiilikuitua kohti ja nämä selvitykset rajoittuvat raaka-aineiden tuottamisesta valmiiksi tekstiilikuiduksi, joka on valmis lähetettäväksi seuraavaan käsittelyvaiheeseen. Uuden tekstiilituotteita koskevan LCA-tuotekategoriaan PEFCR (product environmental footprint category rules) on sisällytetty tuotekategoria kohtaista standardisoitua tietoa elinkaaren vaiheista, joista ei ole ollut yhtenäistä tietoa aikaisemmin. Standardisoimalla osan vaiheista saadaan vertailukelpoisia tuloksia eri vaatekappaleiden PEFCR mukaisten mallien kesken. Lähteessä^[20] on esitetty PEFCR-mallit eri materiaaleista koostuville vaatekappaleille, jotka on määritelty tarkkaan vaatekappaleen kategorian (onko kyseessä T-paita, takki vai housut) ja materiaalikoostumuksen mukaan. Puuvilla T-paidan PEFCR-mallia voidaan soveltaa vaatekappaleelle, joka on 100 %:sta puuvillaa ja se peittää yläruumiin sekä sisältää neulottua materiaalia vähintään 51 %. Puuvilla T-paita ei saa olla kokonaan avonainen edestä tai takaa. Avonaisuutta koskeva sääntö perustuu siihen, että vaatekappaleessa ei saa olla nappeja tai vetoketjua vaatekappaleen kokopituudelta.^[20]

PEFCR-malli jakautuu kolmeen osaan; ydinprosesseja edeltäviin prosesseihin, ydinprosesseihin ja ydinprosessien jälkeisiin prosesseihin. Ydinprosesseja edeltävät prosessit sisältävät raakamateriaalin käsittelyn, kuten kuitujen viljelyn ja puhdistamisen. PEFCR-mallia voidaan soveltaa puuvillaan lisäksi polyesteriin, viskoosiin, polyamidiin, polypropyleeniin, akryyliin, villaan, elastaaniin, klorokuituun, pellavaan, silkkiin ja hamppuun. Jokainen materiaali eroaa maa- ja laitekohtaisten menetelmien ja säädösten mukaan esimerkiksi puuvillavaate voi olla valmistettu perinteisestä puuvillasta, luomupuuvillasta ja kierrätetystä puuvillasta. Polyesteri voi olla tavallisesta tai kierrätetystä polyesterista. Kuitujen kierrätysprosessit on otettava huomioon eroavien laitteistojen osalta. Ydinprosesseja edeltäviin prosesseihin luokitellaan myös raakamateriaalien tuottaminen pakkausmateriaaleihin ja muihin oheistuotteisiin sekä veden, kemikaalien ja energian (polttoaineet, sähkö ja lämpö) kulutus. [20]

Ydinprosesseihin luokitellaan tekstiilikuitujen kehruu langaksi, langan pintakäsittely mukaan lukien synteettisten materiaalien lämpökäsittelyn ja pinnan puhdistamisen kehruuprosessin aikana. Lisäksi ydinprosesseihin kuuluu langan neulominen neulekankaaksi tai tuotteeksi, loppukäsittelyt, kuten värjäys ja painatus, tuotteen kokoaminen, valmistelut tuotteen pakkaamista varten ja tuotteen pakkaus. Valmisteluihin sisältyy vaateen silytys ja laskostus. Kuljetukset tuotannon askelien välillä tulee ottaa huomioon ja liittää niistä koituvat kulutukset ydinprosessiin. [20]

Ydinprosessien jälkeisiin prosesseihin kuuluvat lopputuotteen kuljetukset tehtaasta varastoon ja varastoista kauppoihin, asiakkaan kulkeman meno-paluumatkan päästöt tuotetta noutaessa, tuotteen käytöstä ja loppusijoituspaikasta syntyvät päästöt. Asiakkaiden käyttämät kulku- neuvot tuotteen noudossa on eriteltävä inventaarilaskuissa. Tuotteen käyttöön liittyvät päästöt tulevat tuotteen pesusta ja silytyksestä. Loppusijoituspaikkaan luokitellaan kierrätys ja tuotteen eliminaatio, kuten poltto sekä pakkausmateriaalit, joita käytetään tuotteen pakkaamisessa viimeiselle sijoituspaikalle kuljettamista varten (muovikassit ym.). PEFCR-mallin rajaukset ja rajojen sisäpuoliset toiminnot on esitetty kuvassa 9. [20]

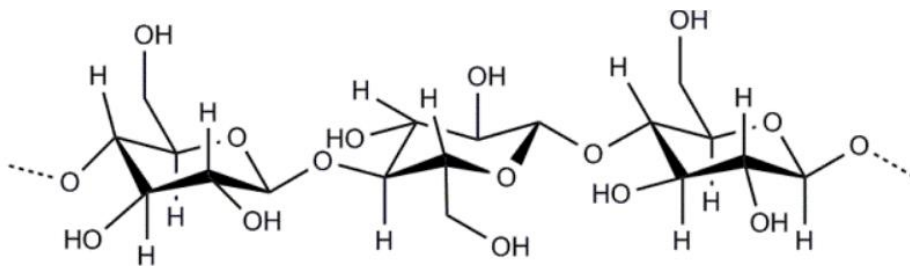


Kuva 9. Kehdosta hautaan systeemin rajat PEFCR:n mukaan. Kuva on muokattu lähteestä [20].

PEFCR-mallilla on rajoituksia, joista on hyvä olla tietoinen. Tekstiilit, jotka ovat tehty muuten kuin neulomalla eivät kuulu PEFCR-malliin, sillä ne luokitellaan kuuluvaksi erilaisen markkinan piiriin. Yhden tuotteen käyttöiälle ei ole määrätty yleistä standardia, joten PEFCR on määrittänyt tässä tutkimuksessa yhden puuvilla T-paidan käyttöiäksi 52 pesua. PEFCR-malliin ei lasketa työntekijöiden työhön liittyviä aktiviteetteja, kuten työmatkoja, aterioita jne. Malliin ei myöskään lueta kuuluvaksi varaston rakennusmateriaaleja, kauppojen infrastruktuuria, tuotteen käyttöön liittyviä palveluita, kuten turvallisuuspalveluita, liikkeenvaihtolaskelmia, oikeusapua ja markkinointia. Vesivarantojen käyttöön liittyvä arviointi on puutteellinen, koska vaikutusarvioon ei ole maakohtaisia tietoja tarjolla. ^[20]

3 Puuvilla

Puuvilla sisältää pääasiassa selluloosaa, joka koostuu toisiinsa linkittyneistä glukoosiyksiköistä. Selluloosan kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 10. Puuvillatekstiiliä voi tuottaa monella eri tavalla raaka-aineen viljelyn, kuidun valmistuksen ja kuidun käsittelymenetelmien suhteen. Kuidun viljelytapa on määritellyt puuvilla tyyppin hyvin pitkälle ja se on myös avainasemassa puuvillan markkinoinnissa. Perinteisen puuvillaviljelyn (Cotton C, CTN) ^[21] rinnalle on luotu vaihtoehtoisia puuvillan viljelymetodeja, jotka keskittyvät parantamaan joitain tavanomaisen puuvillan viljelyyn liitettyjä negatiivisia ympäristövaikutuksia. Markkinoilla on tällä hetkellä tavallisen puuvillan lisäksi luomupuuvilla (Organic cotton) ^[22], parempi puuvilla (Better cotton BCI) ^[23] ja kierrätetty puuvilla (Recycled Cotton).



Kuva 10. Selluloosa. Kuva on muokattu lähteestä ^[24].

3.1 Viljely

Puuvillaa kasvatetaan maissa, joissa on lämmin ja kostea ilmasto, kuten U.S.A:ssa, Kiinassa, Intiassa, Pakistanissa, Uzbekistanissa, Brasiliassa, Egyptissä, Turkissa, Argentiinassa, Kreikassa ja Meksikossa. Puuvilla tarvitsee paljon vettä ja usein kastelua on täydennettävä keinokasteluna. Puuvillan viljelyyn voi kuluu 200-300 m³ vettä / t puuvillakuitua. Puuvilla tarvitsee myös paljon kemikaaleja maaperän lannoittamiseen ja tuholaisten torjuntaan. Lannoittamiseen käytetään ravinteita, kuten typpeä, fosfaattia ja kaliumia. Tehotuotetussa puuvillassa maaperän ravinteet ovat peräisin keinotekoisesti tuotetuista kemikaaleista. Tehotuotettuihin puuvillakasveihin saatetaan myös lisätä kemikaaleja, jotka saavat puuvillakasvin lehdet putoamaan korjuun tehostamiseksi. Puuvilla on altis tuholaishyönteisille ja sairauksille, joten puuvillakasviin lisätään torjunta-aineita, kuten hyönteismyrkkyjä, homeenestoaineita ja rikkaruohontorjunta-aineita. Nämä torjunta-aineet ovat ympäristölle haitallisia ja vaikuttavat myös ihmisiin suoraan, mikäli puuvilla poimitaan käsin. Lisäksi torjunta-aineita voi jäädä puuvillakuituihin ja tekstiileihin. Puuvillan tehotuottamisen rinnalle on tullut luonnonmukaisempia viljelymenetelmiä, joissa puuvillan viljelyyn liittyviä ympäristöongelmia yritetään vähentää. [25]

3.1.1 Tehotuotettu puuvilla

Puuvillaan (Cotton C) viitattaessa tarkoitetaan tehotuotettua puuvillaa, jonka valmistamisessa ei oteta huomioon ympäristöystävällisyyttä tai arvoketjuun osallistuvien ihmisten ja eläinten hyvinvointia. Tavanomaisen puuvillan markkina-arvoa voi myös seurata pörssissä vaihtopuuvilla Trading cotton, (CTN) nimellä [21]. Tietyillä puuvillaplantaaseilla käytetään niin kutsuttua Bt-puuvillaa, joka on geneettisesti muokattu tuottamaan itsestään tuholaisten myrkyllistä *Bacillus thuringiensis*-bakteeria, joka tuottaa tuholaisten myrkyllisiä proteiineja. Kiinassa tavanomaisen puuvillan viljelyssä on käytetty tuholaismyrkkyinä DDT:tä (diklooridifenyylitrikloorietaania), organofosfaatteja ja pyrethroideja 1980-luvulta lähtien. Geenimuokatun hybridipuuvillan viljely tavanomaisilla puuvillaplantaaseilla on nostanut suosiotaan, sillä tuholaistorjunta-aineiden määrää on voitu vähentää. Hybridipuuvilla on kahden eri puuvillalajikkeen risteytys, joka tuottaa enemmän satoa tavallisiin puuvillalajikkeisiin verrattuna. Tuholaisten vastustuskyky on lisääntynyt huomattavasti vuosien myötä

tuholaismyrkyille ja 90-luvulla kiinalaiset viljelijät joutuivat lisäämään myrkkujen määrää plantaaseilla. Puuvillan saanto heikkeni, koska tuholaiset lisääntyivät pelloilla. Tämä ongelma motivoi kehittämään ratkaisun tuholaisten torjuntaan geenimanipulaation kautta. Bt-bakteeria käytetään myös tuholaismyrkkynä suihkuttamalla sitä kasveihin. Geenimanipulaation kautta on kehitetty puuvillalajike, johon on lisätty Bt-bakteerin geeni. Puuvillalajiketta kutsutaan Bt-puuvillaksi ja se tuottaa tuholaisille myrkyllisiä proteiineja. Bt-puuvilla ei ole hybridipuuvilla, koska lajike on Bt-bakteerin geenin ja puuvillan risteytys. ^[26]

3.1.2 Luomupuuvilla

Luomupuuvillaksi (Organic cotton) luokitellaan puuvilla, joka on viljelty mahdollisimman luonnonmukaisesti luomusertifikaatissa määriteltyjen ehtojen mukaan ^[22]. Luomupuuvillan sertifikaattia saa käyttää, jos puuvillan viljelyssä ja tuholaistorjunnassa käytetään mahdollisimman luonnonmukaisia kemikaaleja. Maaperän ravinteiden parantamiseksi puuvillapelloilla tehdään ristikkäisviljelyä, joka tarkoittaa eri viljelytuotteiden kasvattamista samalla pellolla vuorottain. Toisen viljeltävän kasvin ravinteet saattavat kompensoida toisen kasvin kuluttamia ravinteita maaperästä. Lisäksi maaperää voi lannoittaa maatilan tuottamalla lannalla, komposti- ja viljelyn ylijäämätuotteilla, jotka on tuotettu samalla tilalla tai saatu läheiseltä tilalta. Maaperän lannoittamista täydennetään fosforiitilla ja kiinteällä risiinikakulla (*Ricinus communis*), joka on tehty risiiniöljystä ja se sisältää paljon typpeä, fosforia, kaliumia sekä pieniä määriä mangaania, sinkkiä ja kuparia ^[27]. Ennalta ehkäisevinä tuholaistorjuntameteodeina käytetään vierekkäisviljelyä ja kestävän puuvillalajikkeen valintaa, kuten ylängön puuvillasta risteytettyjen hybridien käyttöä ^[22]. Vierekkäisviljelyssä puuvillan viereen istutetaan kasveja, joita tuholaiset pitävät parempana ravinnonlähteenä puuvillaan verrattuna. Näin puuvilla saa kasvaa rauhassa. Lisäksi tuholaisten torjuntaan saa käyttää luonnonmukaisia tuholaiskarkotteita. Mikäli puuvilla sato kärsii pahanlaatuisesta loistartunnasta, viljelijät käyttävät Bt-bakteeria ja neempuun (*Azadirachta indica*) juuria ^[28].

Luomupuuvillan tuotantoa valvotaan satunnaisten näytteiden avulla ^[29]. Jos löytyy viitteitä geneettisesti muokattujen puuvillalajikkeiden, kiellettyjen kemikaalien, lannoitteiden ja tuholaistorjunta-aineiden käytöstä, viljelijä voi menettää luomupuuvilla sertifikaatin.

Maailmanlaajuisen luomutekstiilin standardeissa (GOTS, the global organic textile standard) vaaditaan, että puuvillan arvoketjun kaikki vaiheet pellolta valmiiksi langaksi on oltava läpinäkyviä ja tuotteiden on oltava helposti jäljitettävissä. Puuvillan prosessoinnissa kaikkien kemikaalien, kuten värien, prosessikemikaalien ja katalyyttien valinnassa on arvioitava tarkasti niiden vaikutusta ympäristöön. Myrkylliset raskasmetallit, formaldehydi, aromaattiset liuokset, funktionaaliset nanopartikkelit ja geneettisesti muokatut organismit entsyymeineen on kielletty. Valkaisun on perustuttava happeen, ei kloorivalkaisuun. Atsovärit ovat kiellettyjä, sillä ne päästävät karsinogeenisiä amiiniyhdisteitä ympäristöön. Painatuksessa ja muissa arvoketjun vaiheissa ei saa käyttää aromaattisia yhdisteitä ja muovikuvioiden painatuksessa ei saa käyttää PVC:tä tai tereftalaatteja. Märkäprosessoinnissa on oltava suunnitelma jätteiden käsittelyyn ja on pidettävä tarkkaa kirjaa kemikaalien, veden ja energian kulutuksesta. Luomupuuvillan arvoketjuun kuuluu viljelyn lisäksi sosiaalinen vastuu, joka sisältää työntekijöiden hyvinvoinnista huolehtimisen. Hyvinvoinnista huolehtimiseen kuuluu, että työn pitää perustua vapaaehtoisuuteen, työntekijöiden ja viljelijöiden on saatava kunnollista palkkaa, työpaikan on oltava turvallinen, lapsityövoima on kielletty, työtuntien on oltava kohtuulliset, syrjintä on kielletty ja humanitaaristen oikeuksien rikkominen on ankarasti kielletty. ^[30]

3.1.3 BC-puuvilla

Viljelijät saavat mainostaa valmistavansa BC (Better cotton)-puuvillaa, jos viljelijät täyttävät BC-standardissa määritetyt ehdot. Ehdoissa mainitaan, että viljelijöiden on käytettävä tuholaisten torjunta-aineita, jotka ovat sallittuja kyseiselle kasville ja torjunta-aine ei saa olla listattuna Tukholman sopimuksessa, joka koskee kiellettyjä kemikaaleja. Tuholaistorjunta-yrkkyjä saa levittää vain täysi-ikäinen ja terve hyönteismyrkkyihin erikoistunut ammattilainen, joka ei ole raskaana tai imetä lasta. Vettä käytetään kasteluun vain juuri sen verran, kun on tarpeen ja veden tuhlaamista vältetään myös muualla prosessissa. Maan käytössä ja muokkaamisessa puuvillan viljelytarkoituksiin on noudatettava maakohtaista lainsäädäntöä, joka koskee maanviljelyä. Puuvillaa viljellään, hoidetaan ja roskia varastoidaan saastuttamista sekä ympäristöhaittoja minimoiden. Pienviljelijöillä on oikeus perustaa vapaaehtoisesti järjestöjä, jotka ajavat heidän etujaan. Lapsityövoima on kielletty, lukuun ottamatta pienviljelijöiden lapset saavat auttaa vanhempiaan töissä, mikäli se ei aiheuta haittaa lapsen

terveydelle, turvallisuudelle, kehitykselle tai koulunkäynnille. Lasten osallistuessa töihin vapaaehtoisesti, aikuisten on valvottava heitä ja annettava kunnollinen perehdytys työhön. Kaikkiin vaarallisiin töihin minimi ikäraja on 18-vuotta. Orjatyövoima ja ihmiskauppioiden osallistuminen työvoiman hankintaan on ehdottomasti kielletty. Työnteon on perustuttava vapaaehtoisuuteen. Työntekijöitä on kohdeltava tasavertaisesti uskonnosta, ihonväristä ja sukupuolesta riippumatta. BC-puuvillalla on oma järjestö nimeltä BCI (Better cotton initiative), joka myöntää luvan BC-puuvillan sertifiointiin käyttöön. Kriteerien täyttymistä valvotaan satunnaisilla näytteillä, joita otetaan joka viljelykausi kaikenkokoisilta viljelytiloilta ja näitä verrataan tavanomaisen puuvillan näytteisiin. Jos vertailussa ilmenee kiellettyjen kemikaalien käyttöä, sertifiointi otetaan pois. Tämän lisäksi viljelijöitä haastatellaan, jotta he voivat kertoa omin sanoin, miten uusiin eettisiin työskentelytapoihin sitoutuminen on muuttanut heidän elämäänsä. [23]

3.1.4 Kierrätetty puuvilla

Kierrätetyn puuvillan käyttö vaatealalla on lisääntynyt viime vuosina. Monet vaateketjut ovat perustaneet kampanjoita houkuttellakseen kuluttajia tuomaan heille vanhoja käytettyjä vaatteitaan. Näitä vaateketjuja ovat muun muassa Seppälä [31], H&M [32], Kappahl [33] ja Levi Strauss & CO [34]. Tällä hetkellä puuvillaa kierrätetään lähinnä mekaanisesti. Mekaanisessa tekstiilikuidun kierrätyksessä kuitu pysyy kokonaisuutena koko prosessin ajan.

3.2 Puuvilla prosessin raaka-aineena

Puuvillan korkean selluloosapitoisuuden (94 %) ja selluloosan vetysidosten takia puuvillan kuitu on luja ja joustamaton. Kypsä puuvillakuitu imee hyvin väriä, koska kuidun sisällä on yhtenäinen ontto putki, joka myös pitää värin sisällään. Epäkypsät ja kuolleet kuidut erotellaan kypsien puuvillakuitujen joukosta, koska ne erottuvat vaaleina värjättyissä tekstiileissä. Epäkypsien ja kuolleiden kuitujen huono värinimukyky johtuu kuitujen litteästä

muodosta ja yhtenäisen onton ytimen puuttumisesta. Kuitujen maturiteettien eron voi myös havaita optisesti. Heijastamalla puuvillakuituja himmeällä valolla, voi huomata epäkypsien ja kuolleiden kuitujen heijastavan valoa voimakkaasti, kun taas kypsät kuidut hohtavat tasaisesti. Kypsä puuvillakuitu on pitkä ja loivan kihartuva. Kuidun pituuden ja lievän kiharuuden ansiosta puuvillakuidut kietoutuvat hyvin yhteen ja muodostunut lanka on vahvaa. ^[35]

3.2.1 Puuvillan prosessointi

Puuvillalangan valmistusprosessissa pellolta tulleet puuvillan kukat ajetaan läpi rullista, jotka puristavat ja vetävät puuvillan kuidut ulos kukasta ^[36]. Siemenet sekä muut roskat putoavat keräysastiaan. Erotelleet puuvillan kuidut puhdistetaan ja paalataan laitteessa, joka erottelee kuiduista epäpuhtauksia ilmavirran avulla ^[37]. Jokaisesta paalista otetaan näyte, josta mitataan kuidun lujuus, pituus ja väri, koska puuvillakehräämöt ostavat puuvillaa perustuen kuidun ominaisuuksiin. Paalien päältä kuoritaan ohut kerros kompressoitua puuvillaa ja kuidut syötetään niin sanottuun puhallushuoneeseen, jossa kuidut erkanevat toisistaan ilmavaksi kuitukimpuiksi ja loput roskat sekä lehdet erkanevat kuidusta ilmavirran avulla. Eri kuidut tai puuvillalaadut sekoitetaan tässä osassa prosessia, koska ilmavirta saa kuidut sekoittumaan tasaisesti. Tätä toimenpidettä kutsutaan kuidun avaamiseksi. Ilmanvirran avaamat kuitutupot syötetään karstauslaitteeseen, jossa kuidut kampaantuvat samansuuntaisiksi telojen tai levyjen välissä. Yhdensuuntaiset kuidut kerätään väljästi yhteen kiedotuksi hahtuvanauhaksi, joka ei ole kovin vahva. Hahtuvanauhoja venytetään ja kerrataan yhteen, jolloin lujuus lisääntyy. Yhteen kerratut hahtuvanauhat muodostavat esilangan, joka on paljon ohuempi kuin hahtuvanauha, mutta ei vielä yhtä ohut ja tiivis, kuin lopullinen lanka. Valmiiseen lankaan saatetaan lisätä pintakäsittelyaineita, kuten mineraaliöljyjä ja vaarallisilla polyaromaattisia hiilivetyjä, joiden tarkoitus on silottaa langan pintaa ja vähentää pörröisyyttä ^[38].

3.2.2 Poistopuvuillan mekaaninen prosessointi

Vuonna 2012 Suomessa tehtiin TEXJÄTE-tutkimushanke, johon osallistui Suomen ympäristökeskus SYKE, Kuluttajatutkimuskeskus, Hämeen ammattikorkeakoulu (HAMK) ja UFF. Suomen tekstiilijätteen kiertoa tutkittiin ja tällöin selvisi, että kyseisenä vuonna kierrätykseen päätyi 71,2 miljoonaa kiloa tekstiiliä. Kuvan 11 mukaan tästä määrästä päätyi 16,4 miljoonaa kiloa hyväntekeväisyysjärjestöille, jotka ohjasivat tekstiileistä uudelleenkäyttöön 3,4 miljoonaa kiloa, vientiin 8,28 miljoonaa kiloa ja kierrätykseen (mekaaninen) 0,97 miljoonaa kiloa sekä jätehuoltoon 3,80 miljoonaa kiloa. Kokonaisjätteen alkuperäisestä määrästä (70,3 milj. kg) 54,70 miljoonaa kiloa ohjautui jätehuoltoon, jossa tekstiileistä lajiteltiin 34,30 miljoonaa kiloa kaatopaikalle ja 24,20 miljoonaa kiloa energiajätteeksi. Kaikista kierrätykseen saapuneista tekstiileistä 57,2 % oli polyesteriä, 37,4 % puuvillaa ja 5,4 % viskoosia. ^[39]



Kuva 11. Suomen poistotekstiili 2012. ^[39]

Puuvillatekstiilin valmistamisprosessin eri vaiheissa käytetään haitallisia kemikaaleja. Osa kemikaaleista poistuu puuvillasta prosessin aikana ja osasta saattaa jäädä jäämiä markkinoille päätyvään tuotteeseen esimerkiksi tekstiilin viimeistelyaineiden, joiden on tarkoitus jäädä tekstiiliin. Viimeistelyaineita ovat palonestoaineet, lian- ja vedenhylkimiseen tarkoitettut aineen ja pinnoitteet. Osa viimeistelyaineista voi kulua pois tuotteen käytön ja pesun seurauksena. Yksi näistä yhdisteistä on nimeltään nonyylifenolietoksyalaatti (NPE). Kyseistä yhdistettä on käytetty kuitujen valkaisussa, värjäyksessä ja viimeistelyssä. NPE:tä on löydetty monista tekstiileistä, kuten paidoista, pyjamista, farkuista, pyyhkeistä ja alusvaatteista. NPE-pitoisuuksia on mitattu tekstiileistä ja havaittiin, että pitoisuudet vaihtelivat välillä 1-10 600 mg / kg. Suurimmat pitoisuudet löytyivät tekstiileistä, joissa oli yksi tai useampi voimakas väri. Havaittiin, että keskimäärin NPE-yhdistettä poistuu 66,9 % keskimäärin yhden pesun aikana. Tällä yhdisteellä ei ole raja-arvoja, joiden ylittyminen kieltäisi tekstiilin kierrättämisen. NPE:n lisäksi tekstiiliteollisuudessa on monia pysyviä orgaanisia yhdisteitä (POP), joiden käyttöä valvotaan ja rajoitetaan EU:ssa. POP-yhdisteitä tutkitaan tarkasti ja aine kielletään sekä lisätään Tukholman yleissopimukseen, mikäli vakavia terveydellisiä haittoja ilmenee. Haitalliset aineet voivat vaikuttaa tekstiilin kierrätysprosessiin hankaloittamalla teknisiä prosesseja tai ne voivat vaarantaa työturvallisuuden kierrätyslaitoksessa. ^[39]

Mekaanisen kierrätyksen pääperiaatteena on se, että kuidut erotellaan toisistaan ilmavaksi kuituverkoksi, josta valmistetaan kuitukangasta tai vaihtoehtoisesti lankaa ^[40]. Lähteen ^[40] mukaan langan valmistus onnistuu helpoiten tekstiiliteollisuuden hukkamateriaalista, joka ei ole kulunut käytössä ja pesussa, mutta kuitujen kunnan ollessa heikkoja, mukaan saatetaan sekoittaa neitseellistä puuvillaa tukemaan langan lujuutta. Poistotekstiilin käyttö on lisääntynyt tekstiiliteollisuudessa viime vuosina. Raaka-aineena toimivan poistotekstiilin edullisuus ja ympäristönäkökulma ovat toimineet kannusteena käyttöön otossa, mutta käytössä on edelleen haasteita, joihin etsitään ratkaisuja. Poistotekstiilistä valmistettu kierrätystekstiili ei ole kyennyt kilpailemaan laadun suhteen neitseellisestä materiaalista valmistetun tekstiilin kanssa, koska kuluneen kuidun mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat olleet heikkommat. Yleisenä ajattelumallina on, että tekstiilin kierrätys on laatua heikentävä prosessi ja siksi sitä ei mielletä yhtä houkuttelevaksi vaihtoehdoksi, kuin neitseellisestä materiaalista valmistettu tekstiili. On olemassa myös näkemys, että kaikki tekstiilikuidut eivät ole soveltuvia kierrätykseen, koska lopputuote ei välttämättä menesty markkinoilla esimerkiksi polyamidin markkinahinta on alhainen verrattuna muihin kuituihin ja siitä valmistetut kierrätystuotteet eivät välttämättä mene kaupaksi. Haastetta tuo myös yleisesti tekstiilin

kierrätykseen kuitujen ominaisuudet palautua kierrätysprosessissa lähelle alkuperäisiä ominaisuuksiaan. palautuminen vaihtelee eri materiaalien välillä. Kierrätyksen kannalta erottelu on myös tärkeässä roolissa, sillä vahvempilaatuisen kierrätetyn kuidun aikaansaamiseksi on parempi käyttää tekstiilejä, jotka sisältävät vain yhtä materiaalia 100 %.^[41]

Esimerkkinä mekaanisesta prosessista toimii Roznev et al.^[42] esittämä peiton valmistusprosessi. Kyseisessä prosessissa poistotekstiili käy läpi ensin lajittelun tekstiilin kunnan mukaan; Hyväkuntoiset menevät uudelleen käyttöön ja rikkinäiset otetaan uuden langan materiaaliksi. Uudeksi langaksi prosessoitavista tekstiileistä poistetaan kaikki etiketit ja materiaalit lajitellaan. Kankaat viedään silppuriin ja tämän jälkeen kuidut avataan koneen avulla, jossa on monta hammasrullaa peräkkäin. Tämän jälkeen avautut kuidut karstataan ja lanka kehrätään neitsyt puuvillan tavoin. Kierrätyksessä käytettävän poistotekstiilin voi jakaa kahteen osaan: pre consumer ja post consumer^[39]. Pre consumer-kierrätysmateriaaliksi luokitellaan puuvilla, joka ei ole ollut kuluttajien käytössä. Tällainen materiaali on esimerkiksi tekstiilitehtailta saatava tekstiilijäte. Pre consumer-tekstiiliä käyttää esimerkiksi suomalainen Pure Waste Textiles. Kaikki Pure Wasten tuotteiden materiaalit ovat 100 % kierrätettyä puuvillaa. Post consumer-poistotekstiili tarkoittaa poistotekstiiliä, joka on peräisin kuluttajilta. Tekstiiliä on käytetty ja pesty. Suomalainen yritys nimeltä Dafecor käyttää sekä pre consumer- että post consumer-poistotekstiiliä tuotteidensa valmistamiseen. Tekstiili on peräisin esimerkiksi kuluttajilta ja pesuloista. Dafecor on tällä hetkellä ainoa yritys, joka valmistaa tuotteensa mekaanisella kierrätyksellä Suomessa. Poistotekstiilien muokkaaminen on myös yksi kierrätyksen muoto ja sitä tekee esimerkiksi suomalainen yritys nimeltä Globe Hope, joka valmistaa uusia tuotteita kierrätys- ja ylijäämätekstiileistä muuttamalla alkuperäisen tuotteen käyttötarkoitusta uudeksi tuotteeksi.

4 Regeneroidut kuidut

Regeneroitujen kuitujen raaka-aineena toimiva selluloosa on polysakkaridi, joka koostuu β -(1 \rightarrow 4)-linkittyneistä glukoosiyksiköistä. Yksittäisen glukoosimolekyylin sisällä ja viereisten molekyyliden välillä esiintyy vetysidoksia, jotka estävät selluloosan liukenemisen veteen ja yleisiin orgaanisiin liuottimiin. Regeneroitujen tekstiilikuitujen valmistamisessa on

käytetty kahta eri tapaa selluloosan liuottamisessa: vesipohjaista ja suoraliuottimiin perustuvaa liuotusmenetelmää. Useimmissa vesipohjaisissa liuotusmenetelmissä selluloosa saatetaan helpommin liukenevaksi johdokseksi kemiallisten käsittelyjen avulla ennen liuotusta. Tätä liukoisuutta parantavaa käsittelyä kutsutaan derivatisoinniksi, joka tehdään selluloosalle esimerkiksi viskoosiprosessissa rikityksellä ja CCA-prosessissa urealla. Vesipohjaisista regenerointimenetelmistä Biocelsol-prosessissa liukosellu esikäsitellään entsyymillä ennen alkaliliuotusta, jonka jälkeen liuos jäädytetään. Suoraliuotukseen perustuvissa liuotustavoissa selluloosaa ei tarvitse derivatisoida ennen liuotusta, vaan selluloosa liukenee suoraan liuottimiin. Suoraliuotukseen perustuvia prosesseja ovat esimerkiksi Lyocell- ja Ioncell-prosessit.^[43]

4.1 Raaka-aine

Regeneroituja kuituja voidaan valmistaa kaikista lignoselluloosaa sisältävistä raaka-aineista, kuten puista ja kasveista. Regeneroitujen kuitujen valmistamiseen on käytetty jo pitkään lehti- ja havupuita. Puuperäisinä lähteinä on käytetty muun muassa mäntyä, kuusta, koivua ja eukalyptuspuuta. Kasviperäisenä lähteenä on käytetty bambua ja puuvillaa. Puuperäiset selluloosalähteet kasvavat useita vuosia ennen hakkuita, mutta puu on tiheää ja siitä saa runsaasti materiaalia sellunkeittoon. Kasviperäiset lähteiden etuna on nopea kasvuvauhti. Bambulla kestää 4-5 vuotta kasvaa täyteen mittaansa ja puuvillan voi korjata pellolta vuoden sisällä. Selluloosan lähteinä käytettyjen raaka-aineiden kuitujen pituuksissa on huomattavia eroja; esimerkiksi männyn ja kuusen kuitujen keskimääräinen pituus on 3 mm, koivun 1,1 mm, eukalyptuspuun 0,9 mm^[44], bambun 1,86 mm^[45] ja puuvillan kuidun pituus vaihtelee välillä 10-60 mm^[46]. Raaka-aineista valmistettujen liukosellujen ominaisuudet vaihtelevat ja yksi syy vaihteluun liittyy kuitujen pituuteen.

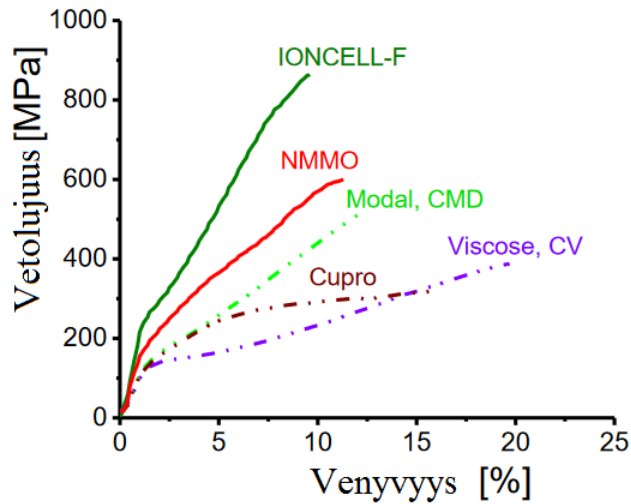
Puun tai kasvin saavuttua sellutehtaalle, se puhdistetaan ligniinistä ja uuteaineista kemiallisten käsittelyjen avulla. Valmistua tuotetta kutsutaan liukoselluksi. Liukosellu sisältää vähintään 92-95 % selluloosaa. Muita ainesosia liukosellussa ovat hemiselluloosat, joita ovat esimerkiksi ksylaani, mannaani, galaktaani ja arabinaani. Puuperäisten raaka-aineiden selluloosa-hemiselluloosa-ligniinisuhde on melko samanlainen keskenään, kun taas kasvi-

peräisillä lähteillä näiden kolmen ainesosan suhde voi vaihdella huomattavasti; esimerkiksi puiden ja bambun koostumus on melko samanlainen, mutta puuvillan koostumus poikkeaa muista huomattavasti. Puut ja bambu sisältävät kuiva-aineissaan selluloosaa noin 40 %, kun puuvilla sisältää selluloosaa 94 %. Puuvillan loput 6 % koostuu muun muassa proteiineista, pektiineistä, vahoista ja orgaanisista hapoista ^[46]. Sellun käsittelemättömien raaka-aineiden koostumus on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Sellun käsittelemättömien raaka-aineiden koostumus (% kuiva-aineista)

Selluloosan lähde	Selluloosa	Hemiselluloosat	Ligniini	Lähde
Mänty	42	28	28	[47]
Kuusi	42	28	28	[47]
Koivu	40	37	20	[47]
Eukalyptus	45	25	24	[48]
Bambu	40-50	25	24	[45]
Puuvilla	94			[46]

Raaka-aineista valmistettujen liukosellujen ominaisuudet vaihtelevat lujuuden, pehmeuden, kosteudenimukyvyn ja karheuden suhteen ^[49]. Yksi sellun lujuuteen vaikuttava tekijä on kuidun pituus. Havupuista on valmistettu sellua, jolla on hyvä lujuus johtuen pitkistä kuiduista. Lehtipuiden, kuten eukalyptuksen ja koivun selluissa on enemmän ksylaania. Ksylaaniin on tutkittu vaikuttavan vetolujuuteen. Koivun sellussa on ksylaania keskimäärin 16 % ja eukalyptuksessa 11,5 %, kun taas havupuiden sellussa ksylaanipitoisuus on 5 %, joka on huomattavasti vähemmän verrattuna lehtipuihin. Ylivoimaisen vetolujuuden takia eukalyptuksen ja koivun sellu on tällä hetkellä suosittu markkinoilla. Lähteessä ^[49] on mainittu myös, että koivusta valmistettu Ioncell-F-kuitu on tällä hetkellä vahvin muunto-kuiduista. Toiseksi vahvin on eukalyptuspuun sellusta valmistettu Tencel-kuitu, joka on valmistettu Lyocell-prosessilla. Viskoosin ja CCA-kuidun vetolujuudet ovat suhteellisen samanlaiset ^[50]. Muuntokuitujen vetolujuus ja venyvyys on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Muuntokuitujen vetolujuus ja venyvyys. Kuva on muokattu lähteestä [49].

4.2 Prosessointi

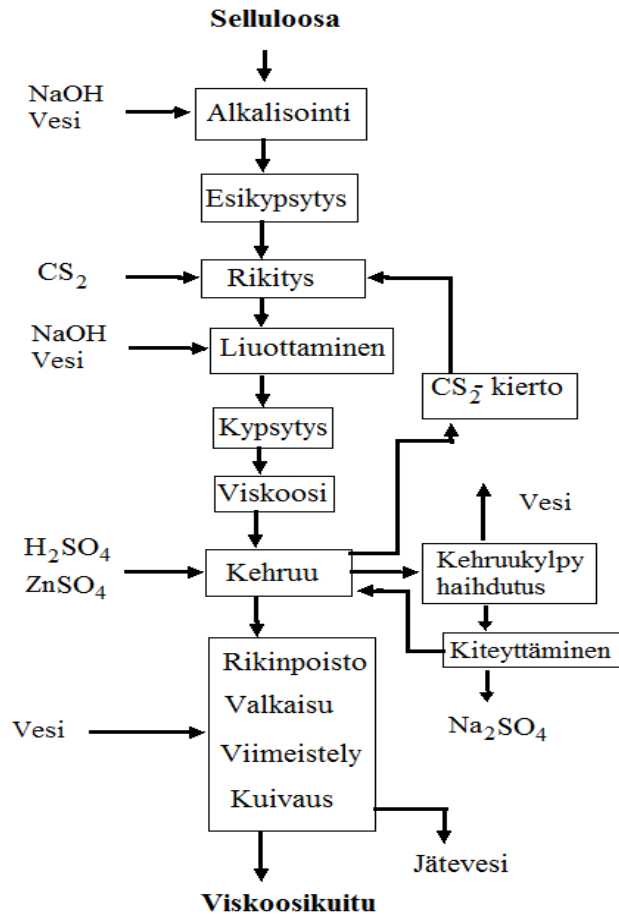
Vesipohjaiset regeneroitujen kuitujen valmistusprosessit alkavat viskoosin ja selluloosakarabamaatin tapauksessa selluloosan derivatisoimisella, mutta Biocelsolin tapauksessa derivatisointia ei tehdä. Käsitelty ja kehrumenetelmänä käytetään märkäkehruta (wet spinning). Tällä hetkellä vesipohjaisia prosesseja regeneroidun kuidun valmistamiseen ovat viskoosiprosessi, suora-alkaliprosessi Biocelsol ja selluloosakarabamaatti-prosessi. Nämä prosessit poikkeavat toisistaan derivatisoinnin ja prosessikemikaalien suhteen. Yhdistäviä tekijöitä prosessikemikaaleissa on se, että selluloosan liuotus tapahtuu alkali liuokseen ja uudelleenkiteyttäminen tehdään rikkihappoon, jonka pitoisuus vaihtelee prosessien välillä.

Suoraan liuottamiseen perustuvat prosessit eivät tarvitse liuotusta edeltävää derivatisointia [51]. Tällä hetkellä suoraa liuotusta voidaan käyttää Lyocell- ja Ioncell-prosesseissa. Lyocell-prosessissa käytetään orgaanista liuotinta nimeltä NMMO ja Ioncell-prosessissa käytetään 1,5-diatsabisyklo[4.3.0]non-5-eenia. Molempien prosessien kehrussa käytetään menetelmää, jossa kehrutahna puristetaan kehrusuulakkeen läpi ilma-aukon kautta kehruukylpyyn (dry-jet wet spinning). Vesipohjaiset ja suoraliuotukseen perustuvat kuidut kehrätään eri tavalla. Viskoosi, selluloosakarabamaatti ja Biocelsol kehrätään märkäkehrulla (wet spinning), joka

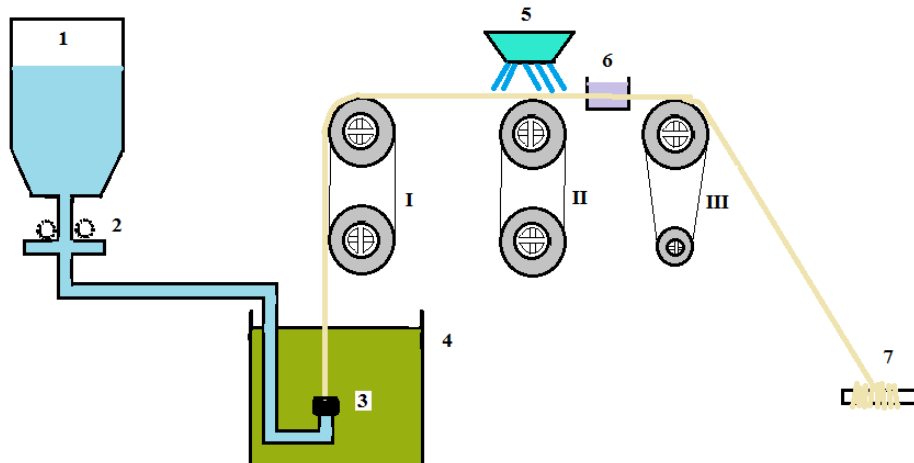
tarkoittaa selluloosafilamenttien puristamista suoraan kehuuliukseen. Lyocell- ja Ioncell-prosessissa kehuumenetelmänä käytetään puolestaan prosessia, jossa kehuutahna puristetaan kehuusuulakkeen läpi ilma-aukon kautta kehuukylpyyn (dry-jet wet spinning). Edellä mainituista regenerointimenetelmistä viskoosi- ja Lyocell-kuitua valmistetaan teollisessa mittakaavassa. Ioncell-F, selluloosakarbamaatti ja Biocelsol ovat vielä toistaiseksi kehityssasteella ^[40].

4.2.1 Viskoosiprosessi

Viskoosiprosessissa selluloosa alkalisoidaan (merseroidaan) eli muutetaan helpommin reagoivaksi alkaliselluloosaksi natriumhydroksidin (NaOH) avulla. Tämän prosessin jälkeen alkaliselluloosa esikypsytetään antamalla alkalisen selluloosan reagoida ilman hapen kanssa siten, että molekyylit katkeavat. Rikityksessä esikypsytetty alkaliselluloosa ja rikkihiili (CS_2) reagoivat keskenään ja tuloksena syntyy oranssin väristä, helposti liukenevaa selluloosaksantaattia, joka liuotetaan laimeaan natriumhydroksidiliukseen. Tästä syntyy väriltään oranssi ja siirappimainen massa, jota kutsutaan viskoosiksi. Jälkikypsytyksessä viskoosia seisotetaan ja suodatetaan epäpuhtauksien erottelemiseksi. Viskoosimassan sisältämä kaasu ja ilmakuplat poistetaan vakuumin avulla (degassoointi). Degassoinnin jälkeen jäykkä viskoosimassa pumpataan kehuusuulakkeiden läpi kehuuliukseen, joka sisältää rikkihappoa (H_2SO_4) ja sinkkisulfaattia (ZnSO_4). Kehuusuulakkeiden läpi puristettu viskoosimassa kiteytyy nauhamaisiksi filamenteiksi. Filamenteja kelataan syöttörullilla venytykseen ja sen kautta jälkikäsittelyyn, jossa viskoosi neutralisoidaan, valkaistaan, viimeistellään ja kuivataan. Viskoosiprosessi on esitetty kuvassa 13 ja kehuuprosessi kuvassa 14. Viskoosin valmistusprosessi tuottaa paljon haitallisia päästöjä ympäristöön, kuten CS_2 :a, H_2S :a ja raskasmetalleja. ^[10]



Kuva 13. Viskoosiprosessi. Kuva muokattu lähteestä [10].



Kuva 14. Viskoosin kehruu. Kuva on muokattu lähteestä [52].

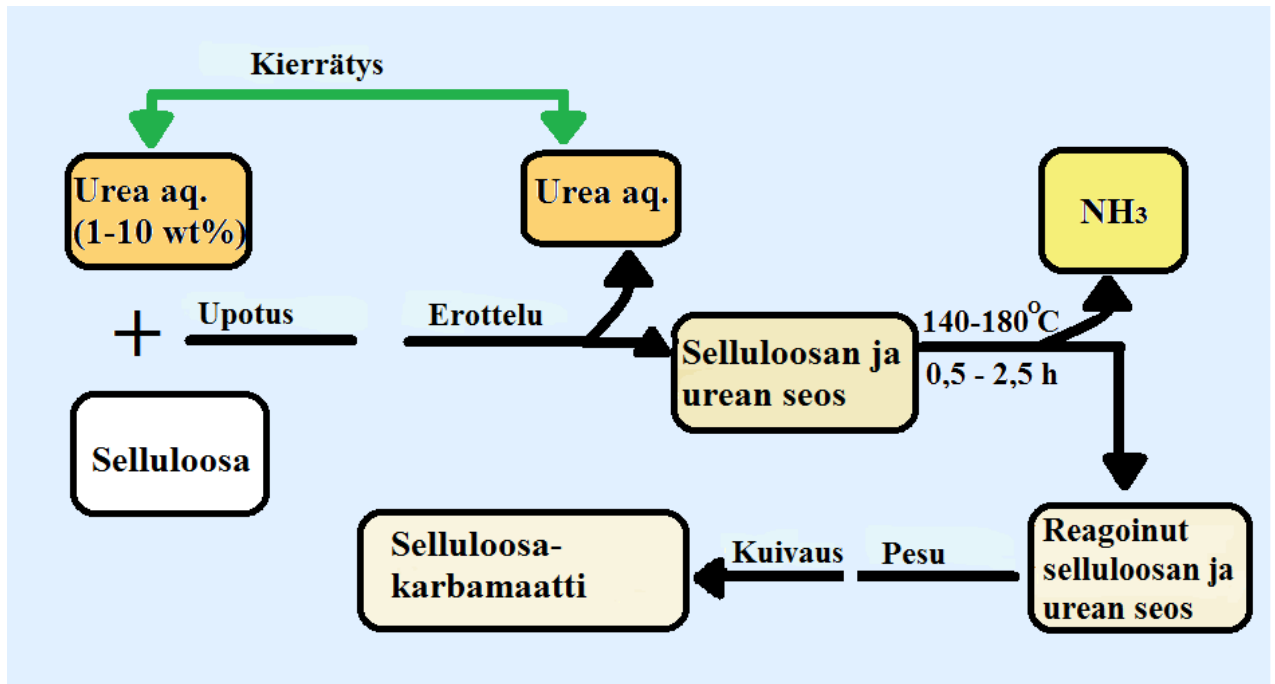
1. Ruostumaton terässäiliö, 2. mittauspumppu, 3. kehrusuulake, 4. koagulaatiokylpy, 5. kuumavesipesu, 6. pintakäsittely, 7. keräysrulla. Rullat: (I) yhdistetty syöttörulla, (II) yhdistetty syöttörulla ja (III) kuumennettu syöttörulla. Kuva on muokattu lähteestä [52].

4.2.2 Biocelsol

Biocelsol-prosessi perustuu selluloosan liuottamiseen entsyymien avulla alkaliliuokseen. Tähän voi käyttää samaa laitteistoa kuin viskoosiprosessissa, mutta kehruliuoksen valmistus tehdään eri tavalla. Prosessin alussa selluloosa käsitellään entsyymillä ja liuotetaan emäksiseen liuokseen pakastus-sulatus-menetelmällä. Tämän jälkeen selluloosalios suodatetaan sekä puristetaan kehrusuulakkeiden läpi kehruukylpyyn, joka sisältää laimeaa rikkihappoa. Selluloosa kiteytyy kehruukylvyssä kuiduksi. Prosessissa käytettävä entsyymi ja muut prosessiin osallistuvat kemikaalit ovat ympäristöystävällisiä, eikä prosessi tuota ympäristölle haitallisia sivutuotteita. Raaka-aineena on käytetty puun sellua. ^[53]

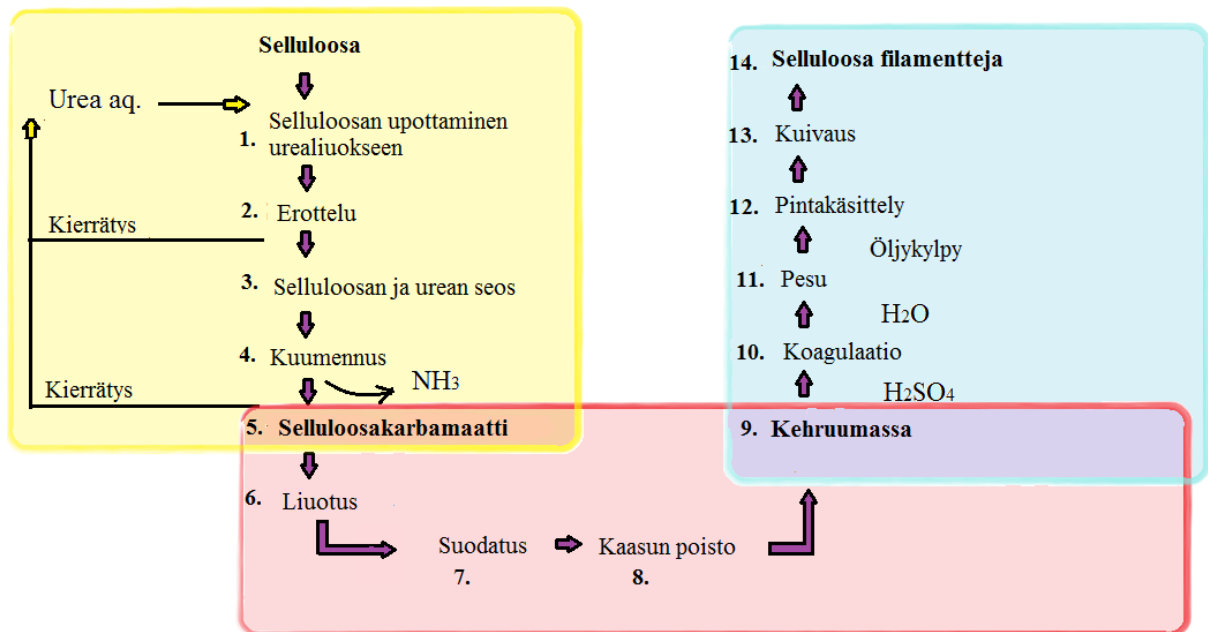
4.2.3 Selluloosakarbamaattiprosessi

Selluloosakarbamaatin muodostaminen urealla edesauttaa selluloosan liukenemistä ja jatkokäsittelyä teollisuudessa. Artikkelissa Fu et al. ^[54] on havaittu, että uudella menetelmällä valmistettu selluloosakarbamaatti voi säilyä jopa vuoden huoneenlämmössä, kun taas viskoosin tapauksessa derivatisoitu johdos (selluloosaksantaatti) on vietävä heti jatkokäsittelyyn. Aikaisemmin selluloosaa muokattiin sekoittamalla siihen ureaa suurina pitoisuuksina karbamaattiryhmien liittämiseksi selluloosan reagoiviin hydroksyyliiryhmiin. Sivutuotteina syntyi muun muassa ylimääräistä isosyanaattihappoa ja biuretaania, jotka ovat haitallisia yhdisteitä. Ylimääräisen urean kierrätys ja prosessissa syntyneiden sivuaineiden puhdistaminen koitui taloudellisesti kannattamattomaksi. Fu et al. ^[54] esittelemässä prosessissa urean määrää on vähennetty selluloosa-ureaseoksessa 10-80 % varoen ylimääräisen ammoniakkin muodostumista synteessin aikana. Selluloosakarbamaatin valmistamisen periaate on esitetty kuvassa 15. ^[54]



Kuva 15. Selluloosakarbamaatin valmistusperiaate. Kuva on muokattu lähteestä ^[54].

Fu et al. ^[52] ovat tutkineet menetelmää, jolla saadaan valmistettua selluloosakarbamaattia vähäisellä määrällä ureaa. Tulosten mukaan suurin osa ureasta reagoi selluloosan kanssa muodostaen selluloosakarbamaattia ilman sivutuotteita. Tutkijat kuvailivat tätä prosessia myös edistylliseksi sen tähden, että se mahdollistaa langan valmistamisen selluloosasta ilman rikkihiiliyhdisteitä ja haitallisia sivuaineita. Tämä prosessi soveltuu hyvin jo olemassa olevaan viskoositehtaaseen. Selluloosakarbamaatin valmistus aloitetaan kuvan 16 mukaan (1) liottamalla 93 %:sta α -selluloosamassaa urean vesiliuoksessa. Selluloosa saa liota urealiuoksessa 25 °C:ssa kolme tuntia ennen (2) erottelua ja (3) uunikuivausta. Tämän jälkeen uunikuivattua selluloosa/ureamassaa kuumennetaan (4). Kuumennuksen aikana urea hajoaa ensin isosyaanihapoksi, joka reagoi selluloosan kanssa muodostaen selluloosakarbamaatin (5). Näyte pestään vedellä ja kuivataan. Urean vesiliuos kierrätetään näytteen suodatuksen ja pesun aikana. Seuraavaksi selluloosakarbamaatti liuotetaan sekoittamalla NaOH/ZnO-vesiliuokseen (6). Liuos suodatetaan epäpuhtauksien poistamiseksi (7) ja degassoidaan (8) alipaineen avulla 8 tuntia (9). Kehruuprosessi aloitetaan työntämällä degassoitu kehrumassa kehrusuulakkeeseen ja reikien läpi (10) huoneen lämpöiseen koagulaatiokylpyyn, jossa on muun muassa H₂SO₄:a ja Na₂SO₄:a. Kehrumassasäikeet kiteytyvät rikkihapon ja natriumsulfaatin vesiliuoksessa selluloosafilamenteiksi. (11) Filamentit pestään, (12) avivoidaan (pintakäsitellään) ja (13) kuivataan. (14) Tuloksena on valmiita selluloosafilamenteja. ^[52]



Kuva 16. Selluloosakarbamaattiprosessin vaiheet. Kuva on muokattu lähteestä [52].

4.2.4 Kierrätettyjen tekstiilikuitujen prosessointi

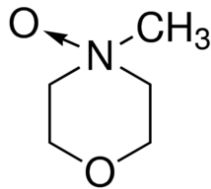
Kemiallisessa kierrätys-prosessissa kuidun rakenne hajotetaan ja kiteytetään uudelleen polymeeriseen muotoonsa kemikaalien ja prosessilämpötilojen avulla. Poistopuuvillatekstiili erotetaan ensin napeista, vetoketjuista ja muista kovista osista. Seuraavaksi tekstiili silputaan ja puhdistetaan eri kemikaaleilla siten, että jäljelle jää sellua, jonka puhtausaste selluloosan suhteen on liukosellun veroinen. Ruotsissa on suunniteltu laitosta, jossa muun muassa poistopuuvillatekstiilistä voitaisiin valmistaa liukosellua prosessilla, jonka nimi on Re:newcell. Lähteen [55] tutkimuksessa on mainittu, että mahdollinen tehdasmittakaavassa toimiva Re:newcell-prosessi liitettäisiin tavanomaiseen viskoositehtaaseen. Tutkimuksessa on myös osoitettu, että tekstiilikuitua voitaisiin valmistaa Lyocell- ja Ioncell-prosesseilla. [55]

Kemiallista kierrättämistä ei ole vielä teollisessa mittakaavassa, mutta on olemassa yrityksiä, jotka kehittävät menetelmiä uuden tekstiilikuidun valmistamiseksi poistopuuvillasta; esimerkiksi Re:newcell:n lisäksi on yritys nimeltä Saxcell, joka valmistaa liukosellua poisto-

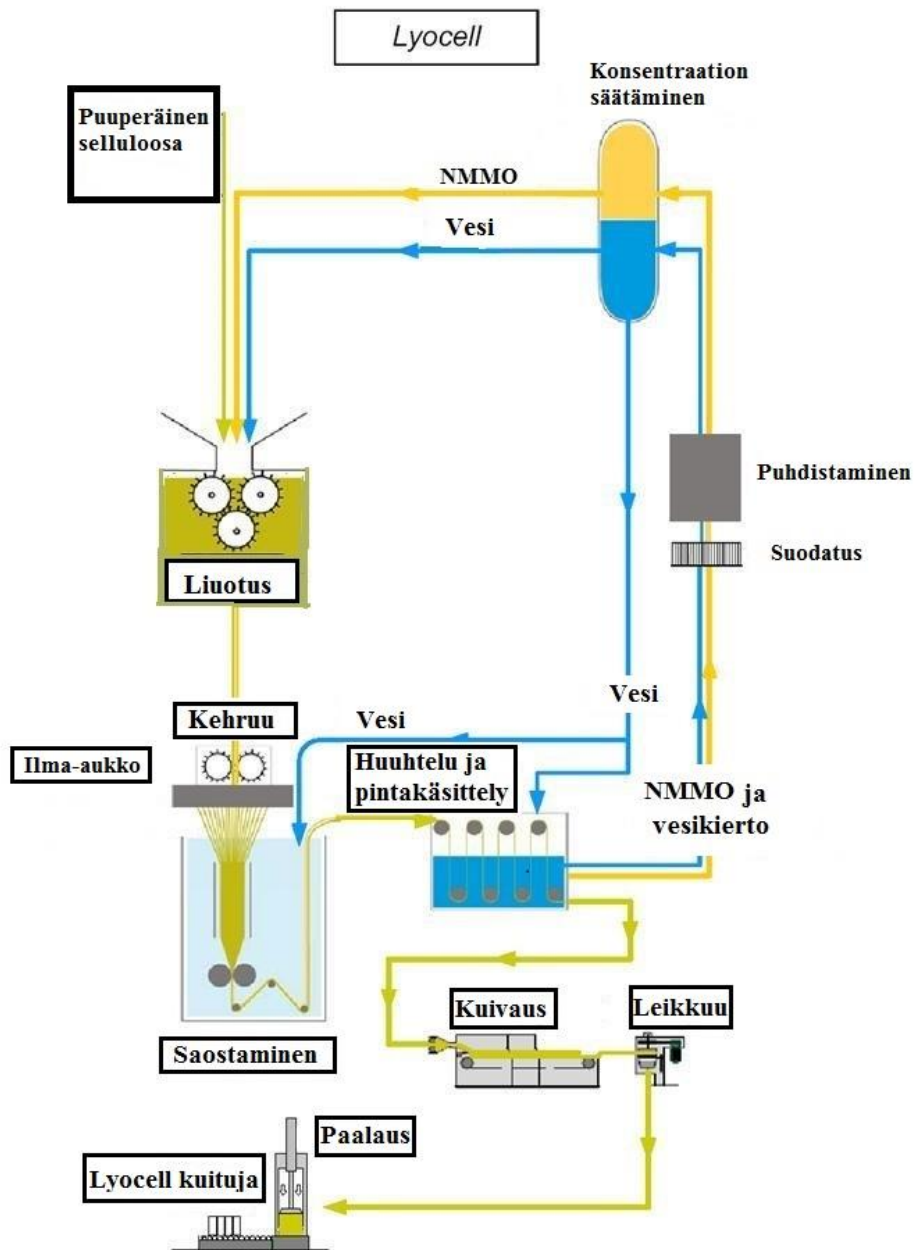
puuvillasta ^[56]. On olemassa myös amerikkalainen Evrnu, joka on valmistanut protovaatteen poistopuuvillasta ^[57]. Lisäksi on olemassa useita projekteja, joissa tutkitaan suljettua kiertotaloutta tekstiileille ja tekstiilin kemiallinen kierrätys on yksi kiertotalouden vaiheista. Näitä projekteja ovat muun muassa Design driven value chains in the world of cellulose (DWOc) ^[58], Teki the relooping fashion initial ^[59], SaXcell, Worn again ja Mistra future fashion ^[60]. Lenzing on myös ilmoittanut aloittavansa tekstiilikuidun valmistamisen Lyocell-prosessilla ^[61].

4.2.5 Lyocell

Lyocell-prosessissa käytetty NMMO-liuotin on mahdollistanut regeneroidun kuidun valmistamisen ilman derivatisointia ^[52]. NMMO:n kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 17 ja Lyocell-prosessi kuvassa 18.



Kuva 17. NMMO. Kuva on peräisin lähteestä ^[62].

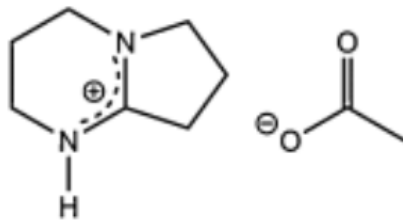


Kuva 18. Lyocell-prosessi. Kuva on muokattu lähteestä ^[63].

Lyocell-prosessilla voi valmistaa tekstiilikuitua mistä tahansa liukosellusta. Liukosellu liuotetaan NMMO:n avulla. Selluloosan liuettua, seuraa kehruvaihe, jossa liuennut selluloosa työnnetään kehrusuulakkeiden läpi kehruliukuokseen. Kehruuliukuoksessa selluloosasäikeet koaguloituvat filamenteiksi. Tämän jälkeen filamentit huuhdellaan ja pintakäsitellään aineilla, jotka silottavat pinnan. Pintakäsittelyn jälkeen filamentit kuivataan ja leikataan halutun pituisiksi kuituiksi sekä paalataan. ^[63]

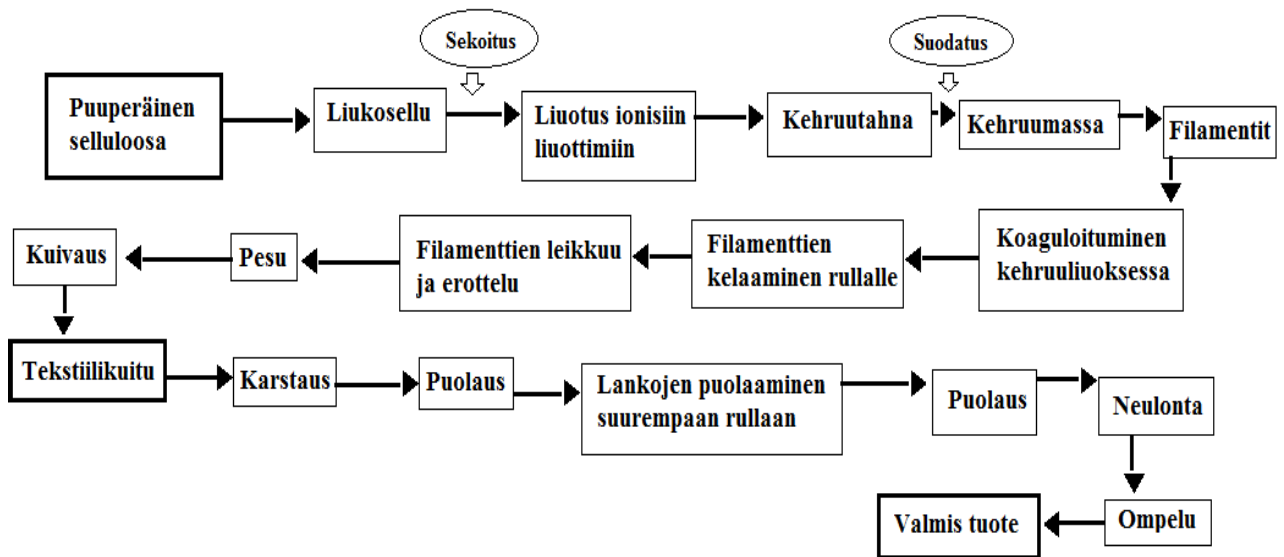
4.2.6 Ioncell

Ioncell-prosessi on äskettäin kehitetty suoraliuotusmenetelmä regeneroidun teekstiilikuidun valmistamiseen käyttämällä ionisia liuottimia. Liuottimen raaka-aineet ovat suojoja, joilla on poikkeuksellisen alhainen sulamispiste (alle 100 °C) ja ne kykenevät liuottamaan selluloosan ilman myrkyllisiä sivutuotteita. Liuottimena on käytetty mm. 1,5-diatsabisyklo[4.3.0]non-5-eenin etikkahapposuolaa, (DBN:n etikkahapposuola [DBNH][OAc]). Kyseinen ionipari on osoittautunut erinomaiseksi selluloosan liuottamisessa ja sen uudelleen kiteyttämisessä kehruliuoksessa. Uudelleen kiteytyneillä selluloosafilamenteilla on ollut ylivertaiset ominaisuudet lujuuden suhteen verrattuna viskoosi- ja Lyocell-filamentteihin. ^[64] DBN:n etikkahapposuola on esitetty kuvassa 19. ^[65]



Kuva 19. DBN:n etikkahapposuola. Kuva on muokattu lähteestä ^[65].

Liukosellu sekoitetaan hyvin ionisiin liuottimiin ja seoksen rakenne muuttuu siirappimaiseksi kehrutahnaksi ^[66]. Kehrutahna suodatetaan ja suodatuksen jälkeisen massa työnnetään silinteriin, josta se puristetaan pienten kehrusuulakkeiden läpi kehruliuokseen. Kehruusuulakkeiden läpi tulleet filamentit kovettuvat kehruliuoksessa ja filamentit kelataan rullaan. Rullan ympärillä olevat filamentit irrotetaan rullasta, katkotaan ja kuidut erotetaan toisistaan. Pesun ja kuivauksen jälkeen kuidut ovat valmiita tekstiilikuituja. Langan valmistus alkaa kuitujen karstaamisesta kuituharsoksi, joka laskostetaan hahtuvanauhaksi. Hahtuvanauhaa venytetään ohuemmaksi langaksi, jota kutsutaan esinauhaksi. Kaksi esinauhaa yhdistetään ja puolataan ensin pienempään puolaan, minkä jälkeen puolattu lanka yhdistetään suurempaan puolaan muiden esinauhajen jatkeeksi. Tätä lankaa voi käyttää tuotteiden neulomiseen. Ioncell-F-kuidun valmistaminen ja langan valmistus on esitetty kuvassa 20. Ionisten liuottimien haasteena on ollut kierrätettävyys, mutta viimeaikainen kehitys on antanut lupauksen tämän ongelman ratkaisuun, joka ei ole vielä teollisessa mittakaavassa ^[67].



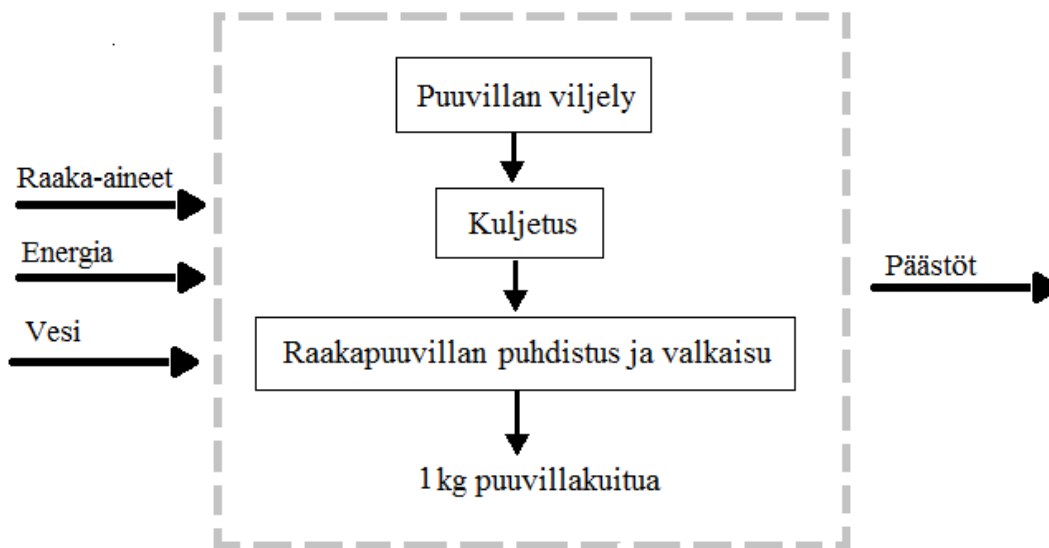
Kuva 20. Ioncell-F-kuidun valmistusprosessi. Kuva on tehty lähteen ^[66] mukaan.

5 LCA valituille referensseille

Tässä kappaleessa käsitellään kahta LCA-tutkimusta, jotka on tehty puuvillalle ja viskoosille. Puuvillan vertailuyksiköksi on määritetty 1 kg puuvillakuitua ja viskoosin LCA:ssa vertailuyksiköksi on valittu 1000 kg viskoosikuitua kahdesta eri tehdastyypistä. Kaikkien tutkimusten rajat on asetettu alkavaksi raaka-aineista ja päättyväksi valmiiseen tekstiilikuituun. Tutkimuksissa vertailuyksiköille on tehty LCI, minkä pohjalta on laskettu ympäristövaikutuksia kuvaavat ympäristöindikaattorit. Vertailussa keskitytään vain hiilijalanjälkeen eli GWP-arvoihin, jotka ilmaisevat ilmastonmuutoksen potentiaalin (kg CO₂ ekv.). Puuvillan sekä viskoosien LCA:n lähteissä oli määritetty LCI ja ympäristöindikaattorit myös monelle muulle tekstiilikuidulle, mutta tähän tutkielmaan otettiin ainoastaan valittuja referenssejä koskevat tiedot.

5.1 Puuvilla

Puuvillan osalta vertailuun valittiin LCA lähteestä ^[68]. Kyseisessä tutkimuksessa selvitettiin puuvillan elinkaaritase ja ympäristöindikaattorien arvot 1 kg:lle puuvillakuitua. Tutkimuksessa on laskettu kyseiset arvot myös 1 kg polyesteriä, polyamidia, akryylille ja elastaanille. Tiedot puuvillan LCI:n laskemiseksi kerättiin kirjallisuudesta, Ecoinvent-tietokannasta, päästöjä koskevista raporteista sekä laitteiden ja tekstiilien valmistajilta. Tutkimuksen tavoitteena oli päivittää puuvillakuidun ympäristöarvot liittyviä tietoja ja antaa vaatteiden suunnittelijoille tietoa tekstiileihin liittyvistä ympäristönäkökohdista. Tutkimuksen rajat ulottuvat raaka-aineen viljelystä valmiiksi tekstiilikuiduksi ja LCI:n tiedot sekä GWP-arvo on laskettu 1 kg:lle puuvillaa. Puuvillakuidun LCA-rajat on esitetty kuvassa 21. Puuvillakuidun käsittelyyn sisältyy puuvillan viljely, kuljetus tehtaalle sekä tehtaassa tehtävät puhdistus- ja valkaisuprosessit. ^[68]



Kuva 21. Puuvillakuidun LCA:n rajat. Kuva on tehty lähteen ^[68] pohjalta.

LCI:n laskemisessa sovellettiin sääntöä, jossa tutkimuksesta jätettiin ulkopuolelle kaikki päästöt, joita on alle 1 % vertailuyksikköä kohden (1 kg puuvillakuitua). Tutkimuksesta saatuja LCI-tuloksia analysoitiin muun muassa IPCC 2007-, USETOX- ja ReCiPe-vaikutusarviointimenetelmillä. USETOX-vaikutusarviointimenetelmää käytettiin karsinogeenisten sekä ympäristölle myrkyllisten kemikaalien laskentaan ja ympäristövaikutusten laskentaan käytettiin ReCiPe-vaikutusarviointimenetelmää. Puuvillakuidun LCI laskettiin käyttäen Ecoinvent 2.2-tietoja eri kemikaaleille. Tuloksena saatiin määritettyä, että 1 kg

puuvillan valmistamiseen tarvitaan energiaa yhteensä 8,7 MJ ja tämä kulutus jakautui dieselin kulutukseen 8,2 MJ ja fossiilisen polttoaineen kulutukseen 0,5 MJ. Sähköä tarvittiin 0,41 kWh ja vettä 7,1 l. GWP-arvo oli laskettu LCI:n pohjalta ReCiPe-vaikutusarviointimenetelmällä ja LCI:n arvoihin on yhdistetty tiedot Ecoinvent:stä 2.2. GWP-arvo, joka laskettiin 1 kg:lle puuvillaa oli 3,040 kg CO₂ ekv. ^[68]

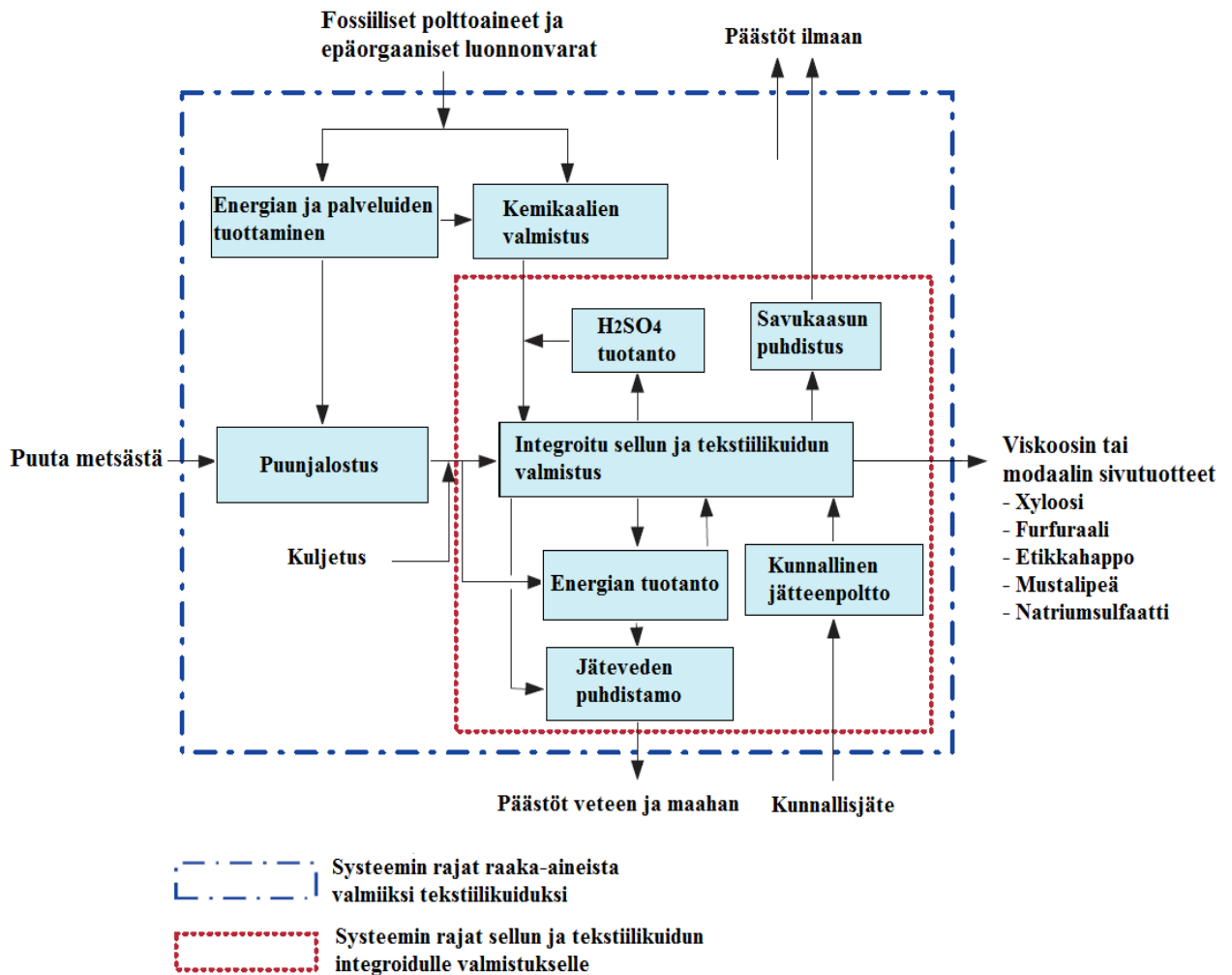
Muita ympäristöä kuormittavia tekijöitä puuvillan tuotantoketjussa koko elinkaaren ajalta on märkäprosessointi, johon kuuluu värjäysprosessi. Värjäysprosessi kuluttaa paljon energiaa ja vettä sekä sisältää ympäristölle haitallisia kemikaaleja. Nämä seikat näkyvät ympäristövaikutusarvioinnissa eri ympäristöindikaattoreissa, kuten epäorgaanisten ja fossiilisten luonnonvarojen kulutuksessa, happamoitumisen potentiaalissa, otsonikerroksen kuluttamisessa ja myrkyllisyyttä ilmaisevissa indikaattoreissa. Epäorgaanisten ja fossiilisten luonnonvarojen arvot tulevat muun muassa veden ja energian kulutuksesta. Happamoitumisen potentiaaliin vaikuttavat kemikaalipäästöt SO₂ ja NO_x, jotka tulevat pääasiassa puuvillan viljelystä, värjäyksestä, kokoamisprosessista ja käytössä tapahtuvasta pesusta. Otsonikerroksen kuluttamista ilmaisevaan indikaattoriin vaikuttaa NO_x-päästöt, jotka syntyvät värjäysprosessista ja puuvillatuotteen kokoamiseen käytetystä energiasta. Puuvillan viljelyn aiheuttamat ympäristövaikutukset näkyvät puolestaan vedenkulutuksessa, rehevöitymisen potentiaalissa ja myrkyllisyyttä ilmaisevissa indikaattoreissa. Vedenkulutus tapahtuu 80 % puuvillan viljelyssä. Rehevöityminen johtuu puuvillan viljelyyn käytettyjen lannoitteiden fosforista ja typestä, koska niitä käytetään paljon ja suuri osa kulkeutuu vesistöihin. Myrkyllisyyttä ilmaisevat indikaattorit kertovat viljelyssä käytettävistä tuholaistorjunta-aineista ja värjäyksessä käytetyistä kemikaaleista. Vedenkulutus oli arvioitu puuvillan viljelyn osalta 1 kg puuvillakuitua kohti 2000 l eli vedenkulutus olisi 2000 m³ / t puuvillakuitua kohti. ^[69]

5.2 Viskoosi

Viskoosin raaka-aineena on käytetty enimmäkseen havu- tai lehtipuusta peräisin olevaa selluloosaa. Viskoositehtaita on kahdenlaisia. Integroiduissa tehtaassa viskoosiprosessi on yhdistetty puunjalostuslaitokseen, josta viskoositehdas saa energian toimintoihinsa. Tämä tapa

säästää energiaa ja luonnonvaroja paremmin kuin itsenäisesti toimiva viskoositehdas. Itsenäisesti toimivan tehtaan haittoina ovat suuri energian kulutus, sillä tehdas joutuu itse tuottamaan oman energiansa ja se tapahtuu useimmiten fossiilisilla polttoaineilla. Lisäksi liukosellun kuljettamisesta tehtaalle aiheutuu päästöjä, koska sellu tuodaan joskus tehtaalle rahtina toisesta maasta, joka voi sijaita kaukana.

Tutkimuksessa Chen et al. ^[10] yksi referenssistä on Lenzingin Itävallan viskoositehdas, joka on integroitu sellutehtaaseen. Integroimisen etuna viskoositehdas saa energiansa ja osan prosesseihin tarvittavista kemikaaleista suoraan sellutehtaasta, eikä sellu- ja viskoositehtaan välistä kuljetusta tarvita. Tämä viskoositehdas on esimerkki parhaasta mahdollisesta teknologiasta (BAT, best available technology). Viskoosin raaka-aineena käytetään itävaltalaisista sekä eurooppalaisista pyökkiä, joka kuljetetaan sellutehtaalle junalla tai kuorma-autolla. LCA-tutkimuksen rajojen sisäpuolelle otettiin sellutehtaan käyttämän puun alkuperä, puun kuljetus tehtaalle, selluloosan jalostus puusta liukoselluksi ja viskoosin valmistus liukosellusta. Referenssinä käytettiin 1000 kg kuivaa viskoosikuitua. Sellutehdas saa suurimman osan tarvitsemastaan energiasta puun kuorimajätteestä, mustalipeästä ja viherlipoesta. Integroidun tehtaan raaka-aineiden käyttö on tehokkaampaa verrattuna itsenäisesti toimivaan viskoositehtaaseen. Integroidun sellutehtaan sivutuotteina saadaan ksyloosia, furfuraalia, etikkahappoa ja lignosulfonaattia. Lähteen ^[10] mukaan muut sellutehtaat eivät valmista sivutuotteita yhtä tehokkaasti kuin Lenzingin integroitu sellutehdas. Integroidun viskoositehtaan LCA:n rajat on esitetty kuvassa 22. Integroidun viskoosin GWP-arvo on yhteensä noin 1800 kg CO₂ ekv. / t viskoosikuitua lähteen ^[10] sivun 25 taulukon 13 mukaan. ^[10]

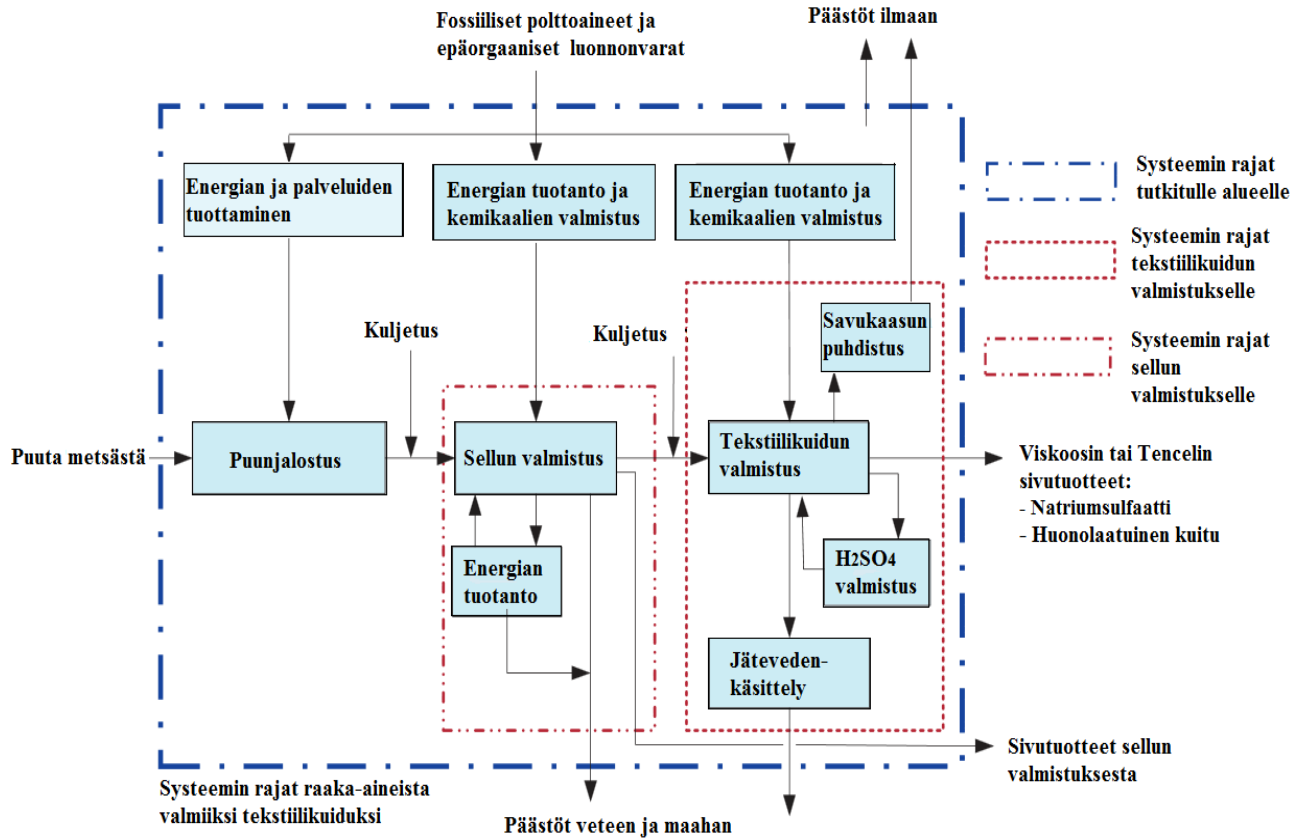


Kuva 22. Sellutehtaaseen integroitu viskoositehdas. Kuva on muokattu lähteestä ^[10].

Integroidun tehtaan viskoosiprosessi saa etikkahapon suoraan sellun valmistuksesta, jossa sitä syntyy sivutuotteena. Tutkimuksessa ^[10] integroidun tehtaan sellun- ja viskoosin valmistukselle on annettu hyvitystä, koska etikkahappo täytyisi valmistaa muuten etyleenistä. Tutkimuksessa sovellettiin samaa allokaatiometodia myös natriumsulfaatille. Sellutehtaan muille sivutuotteille ksyloosille, furfuraalille ja mustalipeälle ei voitu soveltaa systeemin rajojen laajentamista. Kyseisille sivutuotteille sovellettiin taloudellista allokaatiometodia, jossa kaikki ympäristövaikutukset suunnattiin useaan tuotteeseen perustuen markkina-arvoihin. Sivutuotteet, joilla oli korkeimmat markkinahinnat kantoivat suuremman vastuun tuotannon ympäristövaikutuksista. Taloudellista allokaatiometodia sovellettiin myös sellutehtaan huonolaatuisille kuiduille ja kunnallisen jätteenpolttovoimalan tarjoamille jätteenpoistopalvelulle sekä energian toimitukselle. Natriumhydroksidi valmistettiin elektrolyysillä natriumkloridin vesiliuoksesta ja reaktion sivutuotteena syntyi myös klooria ja

vetyä. Allokaatiometodina natriumhydroksidin, kloorin ja vedyn suhteen valittiin massaan perustuva allokaatiometodi, jolla ympäristövaikutukset jakautuivat natriumhydroksidille 52 %, kloorille 46 % ja vedylle 1,3 %. Integroidun tehtaan vedenkulutukseksi on arvioitu prosessiveden osalta 42 m³ ja jäähdytysveden osalta 403 m³ eli yhteensä 445 m³.^[10]

Toinen lähteen^[10] referenssi on Aasiassa valmistettu Lenzingin viskoosi, jonka raaka-aineena toimii pääasiassa eukalyptuspuusta valmistettu liukosellu. Raaka-aineena käytetty eukalyptuspuu, kasvaa eteläisellä pallonpuoliskolla ja siitä valmistettu liukosellu kuljetetaan rahtialuksella Aasian ja Euroopan tehtaisiin. Viskoosia valmistava tehdas toimii omana prosessinaan, eikä ole integroituna sellutehtaaseen. LCA-laskuihin on otettu mukaan vaiheet raaka-aineen syntyperästä valmiiksi kuiduksi. Tutkitun systeemin rajojen sisäpuolelle kuuluvat liukosellun valmistus, kuljetus sekä kuidun valmistaminen liukosellusta. Tutkimuksen raja päättyy valmiiseen viskoosikuituun eli niin sanotusti tehtaan portille. Lähteen^[10] sivun 25 taulukon 13 mukaan 1000 kg Aasian viskoosia tuottaa 5800 kg CO₂ ekv. Aasian viskoosin tutkimuksen rajat on esitetty kuvassa 23. Aasian viskoositehtaat käyttävät pääasiassa 99 % fossiilisia polttoaineita tehtaan lämmön tuottamiseen, kuten hiiltä ja öljyä. Aasian viskoosin ympäristöindikaattorien arvot on kerätty taulukkoon 2. Aasian viskoosin vedenkulutukseksi on arvioitu prosessiveden osalta 11 m³ ja jäähdytysveden osalta 308 m³ eli yhteensä 319 m³.^[10]



Kuva 23. Yksin toimivat sellu- ja viskoositehdas. Kuva on muokattu lähteestä ^[10].

Liukosellun valmistus tapahtuu tehtaassa, jossa puuaineesta poistetaan ligniini ja hemiselluloosaa. Tuloksena syntyy selluloosakuitua, joka on pääasiassa 90-94 %:sta α -selluloosaa. Selluloosan ohella syntyneet sivutuotteet, kuten muun muassa mustalipeä poltetaan energian tuottamiseksi ja lasketaan osaksi viskoosiprosessiin kulkeutuvaa uusiutuvaa energiaa, sivutuotteiksi tai osaksi jätevirtaa, joka kulkeutuu kunnalliseen jätteenkäsittelylaitokseen. Tutkittu viskoosiprosessi käyttää myös ulkoista energiaa, joka on peräisin puuhakkeesta tai puun kuoresta. On laskettu, että kyseinen sellutehdas tuottaa puusta noin 10 % sivutuotteita. Aasian viskoosin liukosellu voi olla peräisin eri puolilta maailmaa ja tehtaiden teknologian taso voi vaihdella huomattavasti. Tämä tuo LCA-tutkimukseen hieman epävarmuutta. Aasian viskoosin liukosellun valmistaneesta tehtaasta ei katsota tulevan sivuainevirtoja, kuten Itävallan sellutehtaasta, josta saadaan sivuainevirtoina mustalikööriä, furfuraalia, etyyliasettaattia ja jäteveden käsittelyssä syntynyttä liejua, jota voi käyttää biopolttoaineena. Liukosellun oletetaan tulevan perinteisestä puunjalostamosta. ^[10]

Tutkimuksessa Shen et al. ^[10] mitataan ympäristövaikutuksia kymmenessä eri kategoriassa, jotka ovat elottoman aineen kuluttaminen, otsonikerroksen kuluttamisen potentiaali, myrkyllisyys ihmiselle, myrkyllisyys makean veden eliöstölle, myrkyllisyys maanpäälliselle eliöstölle, fotokemiallinen hapetustuotteen muodostuminen, happamoituminen, rehevöityminen, vedenkulutus ja ilmastonlämpenemisen potentiaali sadassa vuodessa. Taulukkoon 2 on kerätty arvot ympäristövaikutuksille käyttäen CML-vaikutusarviointimenetelmää. Luvut on laskettu 1000 kg:lle viskoosikuitua kohti. ^[10]

Taulukko 2. Ympäristövaikutukset 1000 kg viskoosikuitua kohti ^[10]

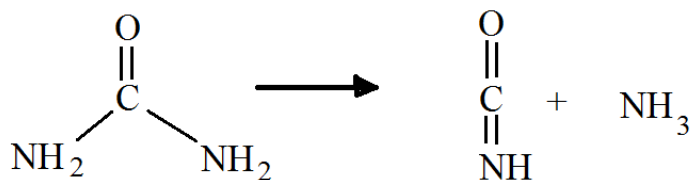
Kategoria	Referenssi	Lenzing viskoosi Itävalta	Lenzingin viskoosi Aasia
Fossiilisten polttoaineiden ja epäorgaanisten luonnonvarojen kulutus (ADP)	kg Sb ekv. / t	14	40
Otsonikerroksen kuluttamisen potentiaali (ODP)	*10 ⁻³ kg CFC 11 ekv. / t	0,03	0,28
Myrkyllisyys ihmiselle	kg 1,4 DB ekv. / t	630	1490
Myrkyllisyys makean veden eliöstölle	kg 1,4 DB ekv. / t	74	160
Myrkyllisyys maanpäälliselle eliöstölle	kg 1,4 DB ekv. / t	11	16
Valokemiallisen otsonin muodostuminen (POCP)	kg C ₂ H ₄ ekv. / t	0,5	1,8
Happamoituminen (AP)	kg SO ₂ ekv. / t	14	45
Rehevöityminen (EP)	kg PO ₄ ³⁻ ekv. / t	1,2	2,3
Vedenkulutus (WU)	m ³	445	319
Ilmaston lämpenemispotentiaali 100:ssa vuodessa (GWP)	t CO ₂ ekv. / t kuitua	1,8	5,7

Viskoosiprosessien ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP) muodostuu prosessiin käytetyistä fossiilisista energialähteistä. Epäorgaanisista lähteistä muodostunutta hiilidioksidia oli 1800 kg CO₂ ekv. / t integroidun viskoositehtaan kuitua ja 5800 kg CO₂ ekv. / t yksin toimivan tehtaan kuitua. Näitä arvoja käytetään myöhemmin vertailuun CCA-kuidun kanssa. Fossiilisten polttoaineiden ja epäorgaanisten luonnonvarojen kulutus (ADP) muodostuu pääasiassa epäorgaanisista polttoaineista, kuten kuparin, öljyn, kaasun tai hiilen käytöstä. Otsonikerroksen kuluttamisen (ODP) potentiaalin indikaattorin antama luku koostuu pääasiassa polttoöljyn ja kaustisoinnin aineiden valmistuksesta. Valokemiallisia hapetustuotteita (POCP), kuten rikkidioksidia muodostuu eniten sellunvalmistuksessa. Happamoitumisen arvot (AP) tulevat pääasiassa liukosellun ja viskoosiprosessin SO₂-päästöistä, NaOH:n

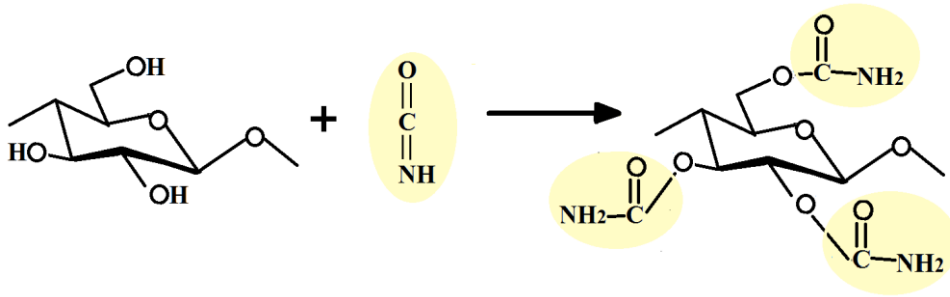
tuotannosta, ylimääräisestä ympäristöön pääsevästä energiasta, CS₂-päästöistä ja rikistä. Rehevöityminen (EP) johtuu NO_x-päästöistä, joita syntyy liukosellun ja viskoosikuidun valmistusprosessissa, NaOH:n valmistuksesta sekä kemikaaleista (esim. fosfaatit ja fosforihappo), joita käytetään voimalan jäteveden käsittelyssä. Myrkyllisyyttä kuvaavien indikaattoreiden pääasialliset lukemat tulevat sellutehtaan kaustisointisuolan (NaOH), liukosellun, viskoosiprosessin ksantaatin (CS₂) ja sulfaatin valmistuksesta, sellun valmistuksessa käytettävistä klooridioksidista (ClO₂) ja kalsiumkarbonaatista (CaCO₃) sekä ympäristöön karkaavasta ylimääräisestä energiasta. ^[10]

6 Soveltamisalan ja tavoitteiden määrittely

VTT:n kehittämä CCA-prosessi pohjautuu selluloosan käsittelyyn urealla ^[70]. Kyseisessä prosessissa selluloosasta ja ureasta tehdään seos, joka kuumennetaan. Kuumennuksen seurauksena ureasta muodostuu isosyaanihappoa ja ammoniakkiä. Isosyaanihappo reagoi selluloosan hydroksyyliyhymien kanssa esterireaktiolla muodostaen selluloosakarbamaatin. Haihtunut ammoniakki kerätään talteen sekä palautetaan takaisin ureaksi. Urean hajoaminen isosyaanihapoksi ja ammoniakiksi on esitetty kuvassa 24 ja selluloosakarbamaatin muodostuminen kuvassa 25. Raaka-aineeksi kyseiselle prosessille voi käyttää puu- ja kasvipohjaista liukosellua. Tässä työssä raaka-aineena käytettiin poistopuu villaa, josta valmistetaan liukosellua karbamointia varten.

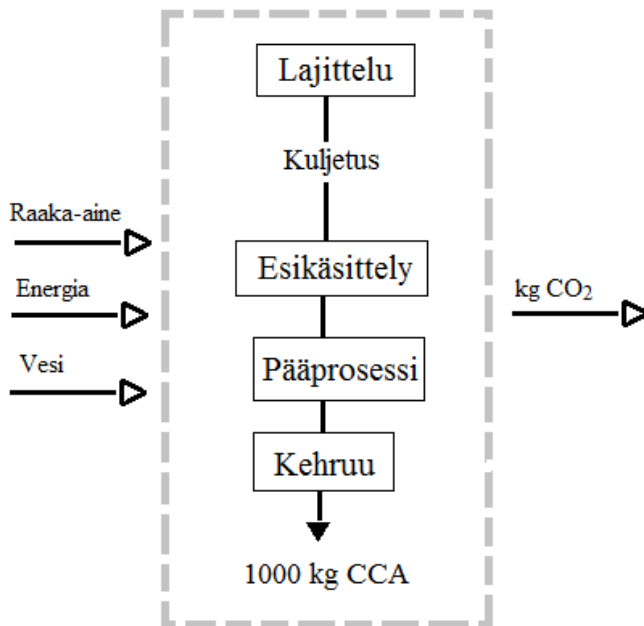


Kuva 24. Urean hajoaminen isosyaanihapoksi ja ammoniakiksi. Kuva on muokattu lähteen ^[70] pohjalta.



Kuva 25. Selluloosakarbamaatin muodostuminen. Kuva on muokattu lähteen ^[71] pohjalta.

Vuonna 2016 Aalto-yliopiston opiskelijat Henttonen, Hassinen, Perttula ja Harlin tekivät tehdassuunnittelun harjoitustyön pohjautuen kyseiseen VTT:n kehittämään (CCA)-prosessiin ^[72]. Kyseinen tehdassuunnittelun harjoitustyö toimi pohjana tämän tutkielman elinkaari-inventaarille. Harjoitustyössä oli esitettyä CCA-prosessiin osallistuvien kemikaalien, energian ja vedenkulutus vaiheittain. Suunniteltu tehdas integroitaisiin sellutehtaaseen, josta prosesseihin tarvittava lämpöenergia saataisiin matalapaineisen höyryn muodossa. Höyry tuotettaisiin lisäämällä poltettavaa biomassaa kuorikattilassa. Inventaarin rajat alkavat puuvillatekstiilin saapumisesta lajittelukeskuksiin ja päättyvät valmiiseen paalattuun CCA-kuituun, jota valmistetaan 1000 kg. Tutkimuksen rajat on esitetty kuvassa 26.



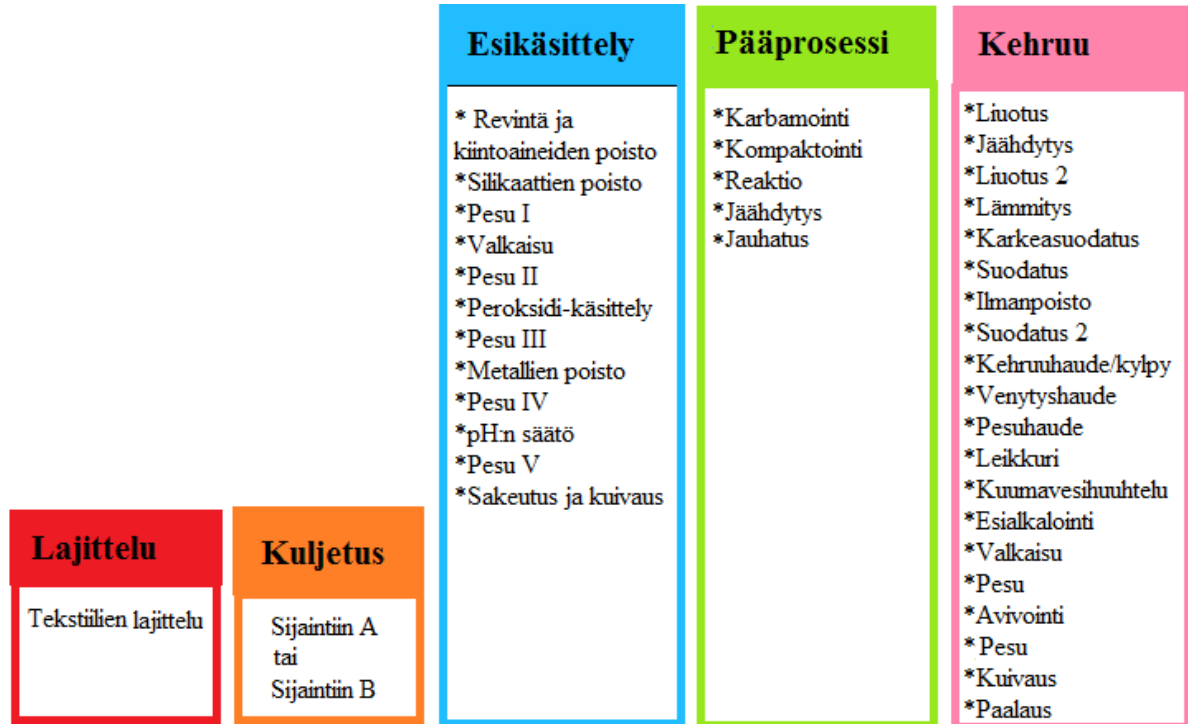
Kuva 26. Tutkimuksen rajat.

Työn tavoitteena oli laskea inventaari kolmelle erilaiselle CCA-prosessille ja käyttää inventaaria pohjana GWP-arvojen määrittämisessä. Jokaiselle CCA-prosessille laskettiin GWP-arvo integroituna ja yksin toimivana tehtaana sekä sijainneissa A ja B. Laskutoimitukset tehtiin VTT:n SULCA 5.0-ohjelmistolla. GWP-arvo määritettiin ReCiPe Midpoint H-vaikutusarviointimenetelmällä. Elinkaari-inventaarin LCI-tiedot olivat peräisin Ecoinvent 3.3:sta.

7 CCA-prosessikaavio ja mallintaminen SULCA 5.0-ohjelmistolla

CCA-kuidun valmistaminen jaetaan esikäsittelyyn, pääprosessiin ja kehruprosessiin kuvan 27 mukaan. Esikäsittelyssä poistopuuvilla prosessoidaan siten, että jäljelle jää vain sellua, jonka α -selluloosapitoisuus on vähintään 94 %. Sellu syötetään pääprosessiin, jossa tapahtuu selluloosan ja ureasta muodostuneen isosyaanihapon esteröitymisreaktio. Esteröitymisreaktion seurauksena syntyy selluloosakarbamaattia. Kehruprosessissa selluloosakarbamaatti liuotetaan ja jäädytetään, jonka jälkeen kehrumassa suodatetaan ja kiteytetään filamenteiksi kehruliuksessa. Filamentit puhdistetaan ja käsitellään avivointikemikaalilla kuidun pinnan silottamiseksi. Valmiit kuidut kuivataan ja paalataan. Tässä työssä laskettava LCI alkaa puuvillavaatteiden lajittelulla ja päättyy valmiiseen paalattuun kuituun. Kaikki kemikaalit sekä veden- ja energiankulutus lasketaan 1000 kg:lle valmista CCA-kuitua. Energialähteinä ovat sellutehtaan tuottama lämpö ja tavanomainen verkkosähkö. Energiankulutus käsittelyvaiheissa reaktio, liuotus, jäädytys ja liuotus 2 laskettiin lähteen ^[73] mukaan. LCI laskettiin ensin Aalto-yliopiston työryhmän suunnitteleman tehtaan prosessikaavion mukaan, jossa on esitetty käytetyt kemikaalit 1595 kg CCA:n valmistamiseen. Prosessi on mallinnettu SULCA 5.0:ssa ensin tälle 1595 kg:lle CCA:ta, mutta tulokset on skaalattu 1000 kg:lle ja jokainen vaihe on esitetty 1000 kg CCA:n mukaan. Tase laskettiin ensin kaikille osaprosesseille, minkä jälkeen ne jaettiin (agglomeroitiin) kolmeen osaan GWP-arvojen analysoinnin helpottamiseksi. Osaprosessit agglomeroitiin esikäsittelyyn, pääprosessiin ja kehruprosessiin. Agglomeraatit siirrettiin samalle työsivulle ja näihin yhdistettiin poistopuuvillan lajittelu ja kuljetus tehtaalle. Ecoinvent 3.3:sta haettiin LCI-tiedot kaikille kemikaalille, joita esiintyy prosessissa. Ecoinvent-tietojen lisäämisen ja yhdistämisen jälkeen laskettiin LCI sekä GWP-arvo Recipe Midpoint (H) incl. Long-term vaikutusarviointimenetelmän avulla. CCA-prosessin osa-alueet on esitetty kuvassa 27. Tässä työssä ei

otettu huomioon polyesterin erottelua, joka on suunniteltu lisättäväksi lopulliseen CCA-tehtaaseen.



Kuva 27. CCA-prosessin osa-alueet.

Taseita laskettiin ensin kolme: CCA 1, CCA 2 ja CCA 3. Jokaiselle kolmesta tapauksesta laskettiin 4 eri tilannetta. Yhdessä tilanteessa tutkittu prosessi käyttää kaupallista energiaa ja sijaitsee paikassa A tai B. Toisessa tilanteessa CCA-prosessi käyttää lämpöenergiaa sellutehtaalta ja sijaitsee paikassa A tai B.

- Ensimmäisessä tapauksessa (CCA 1) oletettiin, että CCA-prosessissa ei ole minkäänlaista kemikaalien kiertoa. Kaikki käsittelyvaiheisiin tulevat aineet ovat uusia kemikaaleja.
- Toisessa tapauksessa (CCA 2) oletuksena oli, että CCA-prosessin kaikki kemikaalit ja vesi kierrätetään. Tase koostuu tällöin vain make up-kemikaaleista, joita täytyy lisätä 1000 kg CCA:a kohti.
- Kolmannessa tapauksessa (CCA 3) CCA-prosessilla oli kemikaalien kierto sekä elektrodialyysi, joka tarkoittaa, että 80 % kuluneesta H_2SO_4 :sta ja NaOH:sta saadaan palautettua kiertoon. Make up-kemikaaleja tarvitaan tällöin NaOH:n ja H_2SO_4 :n

osalta vain 20 % verrattuna taseeseen, jossa on kemikaalien kierto, mutta ei elektrodialyysia.

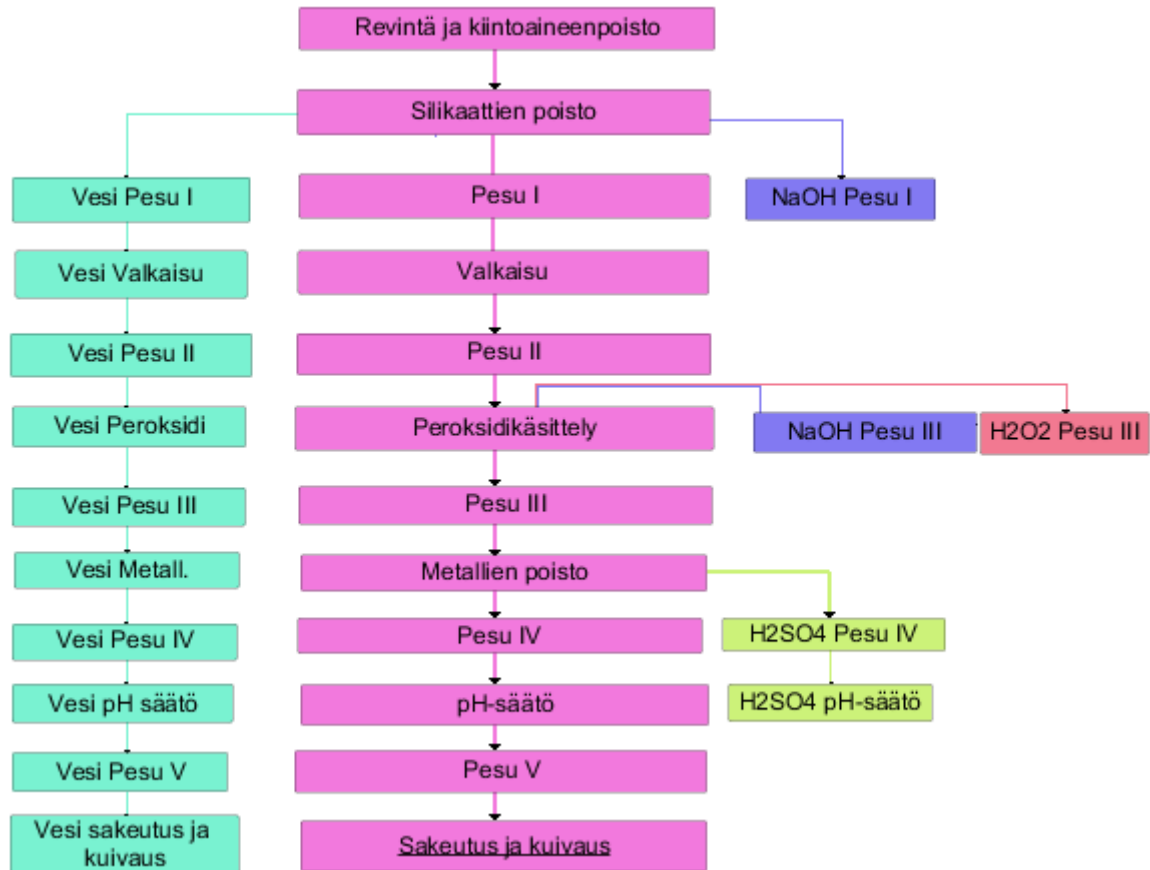
7.1 CCA 1

Ensimmäiseksi laskettu tase on nimeltään CCA 1. SULCA 5.0-ohjelmistossa käsittelyvaiheet esitetään yksittäisinä prosesseina (osaprosesseina), joihin syötetään kemikaaleja, vettä ja energiaa SULCA 5.0:aan lisättävät aineet merkitään input-sarakkeeseen ja poistuvat kemikaalit output-sarakkeeseen. Osa kemikaaleista poistuu käsittelystä takaisin kiertoon tai jätteenkäsittelyyn ja osa kemikaaleista siirtyy seuraavaan työvaiheeseen.

7.1.1 Esikäsittely

Esikäsittelyn tarkoituksena on puhdistaa poistopuuvilla siten, että jäljelle jäisi vain mahdollisimman puhdasta selluloosaa. Esikäsittely muodostuu osaprosesseista: Silikaattien poisto, pesu I, Valkaisu, Pesu II, Peroksidi-käsittely, Pesu III, Metallien poisto, Pesu IV, pH:n säätö, Pesu V sekä Sakeutus ja kuivaus. Käsittelyjen jälkeen poistopuuvilla on liukosellua.

SULCA 5.0-ohjelmistossa ei pysty yhdistämään, kuin yhden aineen kahden osaprosessin välillä. Aineiden yhdistämisellä kahden osaprosessin välillä pystytään osoittamaan, että kyseessä on prosessien välillä etenevä aine ja silloin sitä ei lasketa inventaariin uutena aineena. Koska SULCA 5.0-ohjelmistossa osaprosessien välillä pystytään yhdistämään vain yksi aine, tällöin on tehtävä oma osaprosessipolkunsa aineille, jotka jatkavat osaprosessista toiseen. Kuvassa 28 on SULCA 5.0:ssa laskettu CCA:n esikäsittelyn inventaari, jossa moneen osaprosessiin osallistuvalla aineella on oma prosessipolkunsa. Esikäsittelyvaiheen mallintaminen on aloitettu kokoamalla usean aineen tiedot samaan osaprosessiin, josta usean aineen virtaus jatkuu omina osaprosessipolkuinaan.



Kuva 28. CCA:n esikäsitely SULCA 5.0.

SULCA 5.0:ssa prosessien aineille annetaan nimet sen mukaan, jatkavatko aineet osaprosessista toiseen vai poistuvatko ne osaprosessista. Aineen nimen perään lisätään ”prosessissa”, mikäli aine jatkaa seuraavaan osaprosessiin. Aineet, jotka lisätään osaprosessiin tai poistuvat osaprosessista nimetään joko pelkällä aineen nimellä tai sitten nimen perään liitetään ”sisään/ulos”. Esimerkiksi osaprosessien välillä jatkava vesi nimetään ”Vesi prosessissa” ja lisättävä/poistuva vesi ”Vesi sisään/ulos”. Erittelemällä aineet voi seurata prosessin kulkua helpommin kuin laskisi yhden nimen sisään kaikki aineen lisäykset ja poistot. Aineet, jotka lisätään prosessiin ja poistuvat saman prosessin aikana, nimetään pelkillä aineiden nimillä esimerkiksi O₃. Input- ja output-sarakkeisiin syötettyjen nimien merkitys on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Aineiden nimien merkitys SULCA 5.0:ssa

Nimi SULCA 5:ssa	Merkitys
Poistopuuvilla	Prosessiin lisätty ja prosessissa jatkava poistopuuvilla
Selluloosa	Esikäsitelty poistopuuvilla, joka jatkaa prosessissa
CCA	Karbamoimisen jälkeen muodostunut selluloosakarbamaatti
Vesi sisään/ulos	Lisätty tai poistettu vesi
Vesi prosessissa	Prosessissa jatkava vesi
NaOH	Lisätty tai poistettu NaOH
NaOH prosessissa	Prosessissa jatkava NaOH
H ₂ O ₂	Lisätty tai poistettu H ₂ O ₂
H ₂ O ₂ prosessissa	Prosessissa jatkava H ₂ O ₂
O ₃	Lisätty tai poistettu O ₃
H ₂ SO ₄	Lisätty tai poistettu H ₂ SO ₄
H ₂ SO ₄ prosessissa	Prosessissa jatkava H ₂ SO ₄
Urea	Lisätty tai poistettu urea
Urea prosessissa	Prosessissa jatkava urea
ZnO	Lisätty tai poistettu ZnO
ZnO prosessissa	Prosessissa jatkava ZnO

Silikaattien poisto tehdään natriumhydroksidiliuoksella (NaOH). Tähän osaprosessiin tarvittava energia saadaan aikaan sellutehtaan tuottamasta höyrystä, jota tarvitaan 3,271 GJ. Poistopuuvilla käsitellään liuoksella, joka sisältää 124 kg NaOH:a ja 11050 kg vettä. Käsitelyn seurauksena poistopuuvillan massasta häviää 62 kg silikaattien muodossa ja jäljelle jäävä poistopuuvillamäärä on tällöin 1180 kg. Poistovesi sisältää 31 kg NaOH:a, 2764 kg vettä ja 62 kg silikaatteja. Seuraavaan työvaiheeseen siirtyy 1180 kg poistopuuvillaa, 93 kg NaOH:a ja 8292 kg vettä. Silikaattien poiston input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4. Silikaattien poisto

Yhdiste	Input kg	Output kg
Poistopuuvilla	1242	1180
Vesi sisään/ulos	11050	2764
Vesi prosessissa		8292
NaOH	124	49
NaOH prosessissa		94
Silikaatit		62
Energia, GJ	3,271	

Pesu I-prosessiin tulee 1180 kg poistopuuvilla, 8292 kg vettä ja 94 kg NaOH:a Silikaattien poistosta. Osaprosessiin lisätään pesuliuos, joka sisältää 3539 kg vettä, 97 kg NaOH:a ja 31 kg H₂O₂:a. Pesuliuos on peräisin osaprosessista Pesu III. Pesun päätteeksi 1180 kg puuvillaa ja 8292 kg vettä siirtyy valkaisuun. Pesu I:n poistovesi sisältää 191 kg NaOH:a, 31 kg H₂O₂:a ja 3539 kg vettä. Pesun I input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 5 mukaisesti. Pesusta III kulkeutuvaa pesuliuosta ei ole lisätty Pesun I taseeseen SULCA 5.0:ssa. Kyseinen pesuliuos on otettu huomioon Pesun III:n taseessa.

Taulukko 5. Pesu I

Yhdiste	Input kg	Output kg
Poistopuuvilla	1180	1180
Vesi prosessissa	8292	8292
NaOH prosessissa	94	
NaOH		94

Valkaisuun syötetään 1180 kg poistopuuvilla ja 8292 kg vettä Pesun I prosessista. Valkaisu suoritetaan liuoksella, joka sisältää 348 kg vettä ja 15 kg O₃:sta. Valkaisun päätteeksi 1168 kg poistopuuvilla ja 8292 kg vettä jatkaa Pesun II osaprosessiin. Valkaisun poistovesi sisältää 12 kg poistopuuvilla, 348 kg vettä ja 15 kg O₃:a. Valkaisun input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 6 mukaisesti.

Taulukko 6. Valkaisuprosessi

Yhdiste	Input kg	Output kg
Poistopuuvilla	1180	1168
Poistopuuvillan häviö		12
Vesi prosessissa	8292	8292
Vesi sisään/ulos	348	348
O ₃	15	15

Pesun II osaprosessiin syötetään 1168 kg poistopuuvillaa ja 8292 kg vettä Valkaisusta. Pesuliuksena käytetään Pesu IV-osaprosessin poistovettä, joka sisältää 3539 kg vettä ja 185 kg H₂SO₄:a. Pesun jälkeen 1168 kg poistopuuvillaa ja 8292 kg vettä jatkavat seuraavaan osaprosessiin. Pesuliuksena käytetty 3539 kg vettä ja 185 kg H₂SO₄:a poistuvat prosessista. Pesun II input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 7 mukaisesti. Pesuliusta ei ole laskettu Pesun II taseeseen, koska kyseessä on Pesun IV poistovesi. Pesuliuos on huomioitu Pesun IV:n taseessa.

Taulukko 7. Pesu II

Yhdiste	Input kg	Output kg
Kiertopuuvilla	1168	1168
Vesi prosessissa	8292	8292

Peroksidi-käsittelyyn tarvitaan 3,174 GJ energiaa sellutehtaalta. Pesu II-prosessista kuluu 1168 kg poistopuuvillaa ja 8292 kg vettä Peroksidi-käsittelyyn. Peroksidiliuos sisältää 2053 kg vettä, 41 kg H₂O₂:a ja 129 kg NaOH:a. Käsittelyn päätteeksi 1156 kg poistopuuvillaa, 3539 kg vettä, 97 kg NaOH:a ja 31 kg H₂O₂:a siirtyy seuraavaan prosessiin. Poistovesi sisältää 3539 kg vettä, 97 kg NaOH:a, 31 kg H₂O₂:a ja 11 kg poistopuuvillaa. Peroksidikäsittelyn input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 8 mukaisesti.

Taulukko 8. Peroksidi-käsittely

Yhdiste	Input kg	Output kg
Poistopuuvilla	1168	1156
Poistopuuvillan hävikki		12
Vesi prosessissa	8192	9829
Vesi sisään/ulos	2053	513
NaOH prosessissa		97
NaOH	129	32
H ₂ O ₂ prosessissa		31
H ₂ O ₂	41	10
Energia, GJ	3,174	

Pesun III osaprosessiin syötetään 1156 kg poistopuuvillaa, 3539 kg vettä, 97 kg NaOH:a ja 31 kg H₂O₂:a peroksidi-käsittelystä. Pesu suoritetaan siten, että osaprosessiin lisätään 3539 kg vettä, joka kuljettaa mukanaan 97 kg NaOH:a ja 31 kg H₂O₂:a Pesun I osaprosessiin. Pesun III poistovesi on siis sama kuin Pesun I pesuvesi. Seuraavaan osaprosessiin jatkaa 1156 kg poistopuuvillaa ja 9829 kg vettä. Pesun III input- ja output-tiedot ovat esitettyinä SULCA 5.0:ssa taulukon 9 mukaisesti.

Taulukko 9. Pesu III

Yhdiste	Input kg	Output kg
Poistopuuvilla	1156	1156
Vesi prosessissa	9829	9829
Vesi sisään/ulos	3539	3539
NaOH prosessissa	97	
NaOH		97
H ₂ O ₂ prosessissa	31	
H ₂ O ₂		31

Metallien poistoon tarvitaan energiaa 1,776 GJ sellutehtaalta. Metallien poisto tapahtuu siten, että edeltävästä Pesun III osaprosessista tulee 1156 kg poistopuuvillaa ja 9828 kg vettä, joihin lisätään hapan liuos. Hapan liuos sisältää 10980 kg vettä ja 1156 kg H₂SO₄:a. Käsittelyn päätteeksi poistopuuvilla on puhdistunut liukosellun veroiseksi ja sitä kutsutaan

poistopuuvillan sijasta selluksi. Seuraavaan prosessiin jatkaa 1122 kg sellua, 9828 kg vettä ja 232 kg H₂SO₄:a. Poistovesi sisältää 10980 kg vettä, 924 kg H₂SO₄:a ja 34 kg metalleja. Metallien poiston input- ja output-tiedot ovat esitettyinä SULCA 5.0:ssa taulukon 10 mukaisesti.

Taulukko 10. Metallien poisto

Yhdiste	Input kg	Output kg
Poistopuuvilla (sisään)	1156	1122
Sellu (ulos)		
Vesi prosessissa	9829	9828
Vesi sisään/ulos	10980	10980
H ₂ SO ₄ prosessissa		232
H ₂ SO ₄	1156	924
Metalleja		34
Energia, GJ	1,776	

Pesun IV osaprosessiin syötetään Metallien poistosta 1122 kg selluloosaa, 9828 kg vettä ja 232 kg H₂SO₄:a, joihin lisätään 3539 kg vettä. Pesun jälkeen poistovesi, joka sisältää 3539 kg vettä ja 185 kg H₂SO₄:a johdetaan Pesun II osaprosessiin pesuvedeksi. Seuraavaan osaprosessiin jatkavat 1122 kg sellua, 9828 kg vettä ja 46 kg H₂SO₄:a. Pesun IV input- ja output-tiedot ovat esitettyinä SULCA 5.0:ssa taulukon 11 mukaisesti.

Taulukko 11. Pesu IV

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa	1122	1122
Vesi prosessissa	9828	9828
Vesi sisään/ulos	10980	10980
H ₂ SO ₄ prosessissa	232	185
H ₂ SO ₄	1156	46

pH:n säätöön syötetään edellisestä osaprosessista 1122 kg sellua, 9828 kg vettä ja 46 kg H₂SO₄:a. H₂SO₄ neutraloidaan liuksella, joka sisältää 339 kg vettä ja 38 kg NaOH:a. Neutraloitumisen tuotteina syntyy 17 kg vettä ja 67 kg suoloja. Seuraavaan prosessiin siirtyy

1122 kg sellua ja 9828 kg vettä. Poistovesi sisältää 356 kg vettä ja 67 kg suoloja. pH:n säädön input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 12 mukaisesti.

Taulukko 12. pH:n säätö

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa	1122	1122
Vesi prosessissa	9828	9828
Vesi sisään/ulos	339	356
H ₂ SO ₄ prosessissa	46	
NaOH	38	
Suolat		67

Pesun V osaprosessiin syötetään edellisestä prosessista 1122 kg sellua ja 9828 kg vettä. Tähän seokseen lisätään 3365 kg vettä puhdistamisen vuoksi. Pesun päätteeksi 1122 kg sellua ja 9828 kg vettä jatkavat seuraavaan osaprosessiin. Poistovesi koostuu 3365 kg:sta vettä. Pesun V input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 13 mukaisesti.

Taulukko 13. Pesu V

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa	1122	1122
Vesi prosessissa	9828	9828
Vesi sisään/ulos	3365	3365

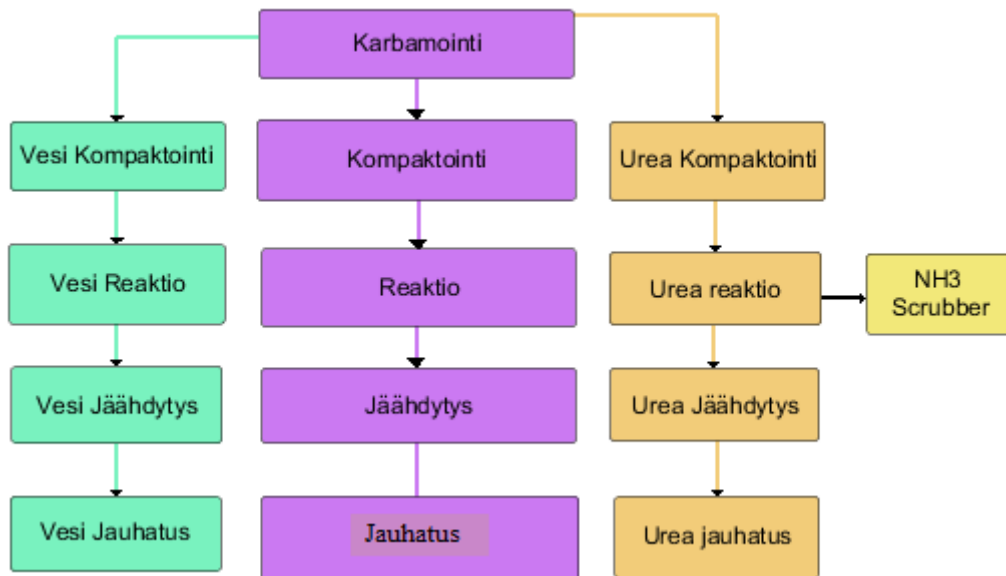
Sakeutukseen ja kuivaukseen syötetään 1122 kg sellua ja 9828 kg vettä, jotka ovat peräisin Pesun V osaprosessista. Selluloosan ja veden seoksesta poistetaan 374 kg vettä kuivattamalla. Seos sakeutuu ja seuraavaan osaprosessiin syötetään seos, jossa on 1122 kg sellua ja 9457 kg vettä. Sakeutuksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 14 mukaisesti.

Taulukko 14. Sakeutus ja kuivaus

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa	1122	1122
Vesi prosessissa	9828	9457
Vesi sisään/ulos		374

7.1.2 Pääprosessi

Pääprosessissa sellu käsitellään urealla ja seos lämmitetään selluloosakarbmaatin muodostamiseksi. Selluloosakarbamaatti liukenee selluloosaa helpommin liuottimiin. Karbamointi ja sitä seuraavat osaprosessit Kompaktointi, Reaktio, Jäähdytys ja Jauhatus muodostavat pääprosessin CCA-tekstiilikuidun valmistukselle. Pääprosessin tuloksena sellusta muokataan selluloosakarbamaatti, joka on valmis liuotukseen. Pääprosessin käsittelyvaiheet SULCA 5.0:ssa ovat esitettyinä kuvassa 29.



Kuva 29. Pääprosessi.

Karbamointi tapahtuu siten, että esikäsittelystä tulevaan 1122 kg selluun ja 9457 kg veteen lisätään liuos, joka sisältää 225 kg ureaa, 26 kg H₂O₂:a ja 577 kg vettä. Käsittelyn

seurauksena H_2O_2 tuottaa happea 4 kg ja loput poistuvat peroksidivetenä (4 kg). 1122 kg sellua, 225 kg ureaa ja 812 kg vettä jatkavat seuraavaan osaprosessiin. Karbamoinnin input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 15 mukaisesti.

Taulukko 15. Karbamointi

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa	1122	1122
Vesi prosessissa	374	1294
Vesi sisään/ulos	919	
Urea	225	
Urea prosessissa		225
H_2O_2	26	4
O_2		4

Kompaktoinnissa ei lisätä tai poisteta kemikaaleja, joten SULCA 5.0:ssa input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 16 mukaisesti.

Taulukko 16. Kompaktointi

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa	1122	1122
Vesi prosessissa	1294	1294
Urea prosessissa	225	225

Reaktiossa edellisestä prosessista tulevaa sellun (1122 kg), urean (225 kg) ja veden (1295 kg) seosta kuumennetaan. Kuumennus saa urean hajoamaan isosyaanihapoksi ja ammoniakiksi. Isosyaanihapo reagoi selluloosan kanssa muodostaen selluloosakarbamaattia (1207 kg). Haihtunut ammoniakki (34 kg) ja vesi (1330 kg) kerätään talteen. Ammoniakki laimennetaan veteen (63 kg). Ammoniakin ja veden talteenotossa virtaa jäähdytysvettä (640 kg). Reaktion input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 17 mukaisesti. Kuumennukseen vaaditaan 4,8 GJ energiaa.

Taulukko 17. Reaktio

Yhdiste	Input kg	Output kg
Selluloosa (output CCA)	1122	1207
Vesi prosessissa	1294	27
Vesi sisään/ulos	63	1130
Vesi jäädytys	640	640
Urea prosessissa	225	105
NH ₃		34
Energia, GJ	4,8	

Kuumennuksen jälkeen selluloosakarbamaatin (1207 kg), urean (105 kg) ja veden (27 kg) seos **jäähdytetään**. Jäähdytyksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 18 mukaisesti.

Taulukko 18. Jäähdytys

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1207
Vesi prosessissa	27	27
Vesi jäädytys	579	579
Urea prosessissa	105	105

Jäähdytyksen jälkeen CCA:n (1207 kg), urean (105 kg) ja veden (27 kg) seos **jauhetaan** hienommaksi. Jauhatuksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 19 mukaisesti.

Taulukko 19. Jauhatus

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1207
Vesi prosessissa	27	27
Urea prosessissa	105	105

7.1.3 Kehruuprosessi

Kehruuprosessissa selluloosakarbamaatti liuotetaan ja käsitellään eteenpäin kehruumassaksi, joka puristetaan kehrusuulakkeiden läpi ja kiteytetään filamenteiksi kehruliuoksessa. Tämän jälkeen filamentit avivoidaan, pestään, leikataan ja paalataan. Kehruuprosessi on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Kehruuprosessi.

Liuotuksessa jauhatuksesta tulleeeseen selluloosakarbamaatin (1207 kg), urean (105 kg) ja veden (27 kg) seokseen lisätään liuos, jossa on 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11770 kg vettä (tämän liuoksen valmistamiseen tarvitaan 2,4 GJ energiaa ja 9683 kg jäähdytysvettä). Selluloosakarbamaatti liukenee NaOH:n, ZnO:n ja veden liuokseen. Seuraavaan vaiheeseen siirtyy 1207 kg selluloosakarbamaattia, 105 kg ureaa, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä. Liuotuksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 20 mukaisesti.

Taulukko 20. Liuotus

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1207
Vesi prosessissa	27	11790
Vesi sisään/ulos	11770	
Vesi jäähdytys	9683	9683
Urea prosessissa	105	105
Energia, GJ	2,4	

Jäähdytyksessä 1207 kg selluloosakarbamaattia, 105 kg ureaa, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä tulee edellisestä osaprosessista ja tämä seos jäähdytetään. Jäähdytys tapahtuu tyypellä, joka kerätään talteen sellutehtaalta ja muutetaan nestemäiseksi sähkön avulla. Sähköä kuluu 0,5268 MWh. Jäähdytyksen jälkeen 1207 kg selluloosakarbamaattia, 105 kg ureaa, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä jatkavat seuraavaan osaprosessiin. Jäähdytyksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 21 mukaisesti.

Taulukko 21. Jäähdytys

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1207
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171
Urea prosessissa	105	105
Sähkö, MWh	0,5268	

Liutuksessa 2 1207 kg selluloosakarbamaattia, 105 kg ureaa, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä lämmitetään lämpimällä lauhdevedellä, joka virtaa säiliön ulkopuolella ja jatkuu seuraavaan vaiheeseen. Lauhdeveden uudelleen lämmitykseen tarvitaan 4,8 GJ energiaa. Lauhdeveden kulutusta ei lasketa taseeseen, koska se on peräisin aikaisemmin käytetystä höyrystä. Liutuksen 2 input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 22 mukaisesti.

Taulukko 22. Liutus 2

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1207
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171
Urea prosessissa	105	105
Energia, GJ	4,8	

Lämmityksessä 1207 kg selluloosakarbamaattia, 105 kg ureaa, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä lämmitetään lauhdevedellä, joka lämmittää tätä seosta myös edellisessä osaprosessissa. Lämmityksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 23 mukaisesti.

Taulukko 23. Lämmitys

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1207
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171
Urea prosessissa	105	105

Karkeasuodatuksessa selluloosakarbamaatin liukenematon jae (60 kg) ja urea (105 kg) poistuvat ja seuraavaan vaiheeseen jatkaa 1147 kg selluloosakarbamaattia, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä. Karkeasuodatuksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 24 mukaisesti.

Taulukko 24. Karkeasuodatus

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1207	1147
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171

Karkeasuodatuksen jälkeen seos **suodatetaan**, jotta loputkin selluloosakarbamaatin liukene-
mattomasta jakeesta saadaan poistettua. Seuraavaan osaprosessiin jatkaa 1122 kg
selluloosakarbamaattia, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä. Suodatuksen input-
ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 25 mukaisesti.

Taulukko 25. Suodatus

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1147	1122
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171

Seuraavaksi seoksesta **poistetaan ilma** ja 1122 kg selluloosakarbamaatin, 923 kg NaOH:n, 171 kg ZnO:n ja 11790 kg veden seos jatkaa seuraavaan osaprosessiin. Ilmanpoiston input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 26 mukaisesti.

Taulukko 26. Ilmanpoisto

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1122	1122
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171

Suodatuksessa 2 selluloosakarbamaattia (1122 kg), NaOH:a (923 kg), ZnO:a (171 kg) ja vettä (11790 kg) sisältävästä kehuuliuksesta tulee kehuumassa. Selluloosakarbamaatin massasta poistuu suodatuksen seurauksena 11 kg. Valmis kehuumassa sisältää 1111 kg selluloosakarbamaattia, 923 kg NaOH:a, 171 kg ZnO:a ja 11790 kg vettä. Suodatuksen 2 input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 27 mukaisesti.

Taulukko 27. Suodatus 2

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1122	1111
Vesi prosessissa	11790	11790
NaOH	923	923
ZnO	171	171

Kehruuhauteessa edellisessä vaiheessa valmistettu kehuumassa puristetaan kehuusuulakkeiden läpi kehuuliukseen, joka sisältää 251 kg Al_2SO_4 :a, 251 kg Na_2SO_4 :a, 1135 kg H_2SO_4 :a ja 4980 kg vettä. Selluloosakarbamaattifilamentit (CCA-filamentit) koaguloituvat kehuuliuksessa. Kehruun tuloksena 1000 kg kiinteää CCA-kuitua ja 5886 kg vettä siirtyy seuraavaan osaprosessiin. Kehruukylvyssä muodostuu 220 kg Na_2SO_4 :a, 339 kg $ZnSO_4$:a ja 157 kg alumiinisuoloja. Kehruun input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 28 mukaisesti.

Taulukko 28. Kehruuhaude

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1111	1000
Vesi prosessissa	11790	5886
Vesi sisään/ulos	4980	10880
NaOH	923	
ZnO	171	
H ₂ SO ₄	1135	
Na ₂ SO ₄		220
ZnSO ₄		339
Alumiisisuolat		157

Venetyshauteessa CCA-filamentteja venytetään lujuuden lisäämiseksi. Tähän käsittelyyn syötetään 1000 kg CCA-filamentteja ja 5886 kg vettä. Venetyshauteessa on 2800 kg vettä itsessään. Tämän vaiheen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 29 mukaisesti.

Taulukko 29. Venetyshaude

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	2800	2800

Pesuhauteeseen syötetään 1000 kg CCA-filamentteja ja 5886 kg vettä. Pesuvettä käytetään 2800 kg filamenttien puhdistamiseen. Seuraavaan käsittelyvaiheeseen siirtyy 1000 kg CCA-filamenttia ja 5886 kg vettä. Pesuhauteen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 30 mukaisesti.

Taulukko 30. Pesuhaude

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	2800	2800

Pestyt CCA-filamentit **leikataan** ja siirretään seuraavaan osaprosessiin. input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 31 mukaisesti.

Taulukko 31. Leikkuu

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886

Kuumavesihuuhtelussa 1000 kg:n CCA-kuitujen ja 5886 kg:n veden sekaan lisätään 3000 kg kuumaa vettä. Huuhteluveden lämmittämiseen on tarvittu energiaa 0,690 GJ. Seuraavaan vaiheeseen siirtyy 1000 kg CCA-kuituja ja 5886 kg vettä. Kuumavesihuuhtelun input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 32 mukaisesti.

Taulukko 32. Kuumavesihuuhtelu

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	3000	3000
Energia, GJ	0,690	

Esialkalointiin saapuneeseen 1000 kg CCA-filamentin ja 5886 kg veden sekaan lisätään liuos, joka sisältää 280 kg NaOH:a ja 2521 kg vettä. Esialkaloinnin jälkeen 1000 kg CCA-kuituja ja 5886 kg vettä siirtyvät seuraavaan käsittelyvaiheeseen. Esialkaloinnin input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 33 mukaisesti.

Taulukko 33. Esialkalointi

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	2521	2521
NaOH	280	280

Valkaisussa 1000 kg CCA-kuituun ja 5886 kg veteen lisätään liuos, jossa on 280 kg perasetaattihappoa ja 2521 kg vettä. Tämän jälkeen valkaistu CCA-kuitu ja 5886 kg vettä jatkavat seuraavaan osaprosessiin. Valkaisun input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 34 mukaisesti.

Taulukko 34. Valkaisu

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	2521	2521
Perasetaattihappo	280	280

Seuraavaksi CCA-kuidut **pestään** 3000 kg vedellä. Seuraavaan osaprosessiin siirtyy 1000 kg CCA-kuitua ja 5886 kg vettä. Pesun input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 35 mukaisesti.

Taulukko 35. Pesu

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	3000	3000

CCA-kuitujen pinta käsitellään **avivointi**-liuoksella, joka sisältää 48 kg viimeistelykemikaalia ja 1952 kg vettä. Tämän jälkeen 1000 kg CCA-kuitua ja 5886 kg vettä siirtyy seuraavaan

osaprosessiin. Avivointi-käsittelyn input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 36 mukaisesti.

Taulukko 36. Avivointi-käsittely

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	1952	1952
Avivointikemikaali	48	48

Pesussa 2 1000 kg CCA-kuitujen ja 5886 kg veden seokseen lisätään 3000 kg vettä. Pesun jälkeen 1000 kg CCA-kuituja ja 5886 kg vettä jatkavat seuraavaan osaprosessiin. Pesun 2 input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 37 mukaisesti.

Taulukko 37. Pesu 2

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886
Vesi sisään/ulos	3000	3000

Kuivauksessa CCA:n (1000 kg) ja veden (5886 kg) seoksesta poistetaan vesi ja jäljelle jää vain 1000 kg CCA-kuituja. Kuivauksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 38 mukaisesti.

Taulukko 38. Kuivaus

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000
Vesi prosessissa	5886	5886

Lopuksi CCA-kuidut **paalataan**. Paalauksen input- ja output-tiedot ovat esitettynä SULCA 5.0:ssa taulukon 39 mukaisesti. CCA-muuttuja merkitään funktionaaliseksi yksiköksi.

Taulukko 39. Paalaus

Yhdiste	Input kg	Output kg
CCA	1000	1000

Prosessin valmistuttua, tulokset lasketaan yhteen. CCA 1:n kokonaiskulutus ja tase on taulukon 40 mukainen.

Taulukko 40. CCA 1 kokonaiskulutus ja tase

1000 kg CCA 1	Input	Output	Tase Input - Output
Poistopuuvilla sisään CCA ulos (kg)	1254	1000	254
Urea (kg)	225	0	225
NaOH (kg)	1494	533	961
H ₂ O ₂ (kg)	67	45	22
H ₂ SO ₄ (kg)	2292	1110	1182
O ₃ (kg)	15	15	0
ZnO (kg)	171	0	171
Na ₂ SO ₄ (kg)	250	220	31
Al ₂ SO ₄ (kg)	250	0	250
O ₂ (kg)	0	4	-4
NH ₃ (kg)	0	34	-34
Peretikkahappo (kg)	280	280	0
Viimeistelykemikaalit (kg)	48	48	0
ZnSO ₄ (kg)	0	339	-339
1000 kg CCA 1 energia	Input	Output	Tase
Energia, (GJ)	20,94	0	20,94
Sähkö, (MWh)	0,5268	0	0,5268
1000 kg CCA 1 vesi	Input	Output	Tase
Vesi sisään/ulos (kg)	49490	40050	9440
Vesi pesu (kg)	25040	25040	0
Vesi jäähdytys (kg)	10900	10900	0

7.2 CCA 2

CCA:n 1 inventaarista laskettu tase kertoo kemikaalien ja aineiden hävikin 1000 kg CCA-kuitua kohti. CCA:ssa 2 oletetaan, että ainoat lisättävät aineet ovat niitä, joita ei saada takaisin kiertoon. CCA:n 2 inventaari on laskettu SULCA 5.0:lla vaiheittain poistopuuvillasta CCA-kuiduksi samalla tavalla, kuin CCA 1, mutta input-tietoihin lisätään vain CCA 1-prosessin energia ja aineet, jotka kiteytyvät tai haihtuvat. Hävikki on merkitty sen käsittelyvaiheen input-tietoihin, johon ainetta lisätään alun perin CCA 1-prosessissa. SULCA 5.0:aan merkityt input-tiedot ovat laskettu 1000 kg:lle CCA 2-kuitua kohti. Lisättävien kemikaalien tiedot on esitetty alla:

NaOH:a kuluu CCA:n 1 pH:n säädössä 38 kg ja kehruukylvyssä 923 kg. Yhteensä 961 kg, joka merkitään koko CCA 2-valmistusprosessin input-tietoihin. Muut NaOH lisäykset on poistettu mallista, koska ne on suunniteltu kiertäviksi. pH:n säädön input-tietoihin merkitään NaOH:n kulutukseksi 38 kg ja liuotuksen input-tietoihin 923 kg.

Ureaa lisätään CCA 1-prosessin karbamoinnissa 225 kg ja tästä määrästä palautuu kiertoon 120 kg. Kiertoon palaava 120 kg ureaa haihtuu ammoniakkinä ja se palautetaan kierron kautta takaisin ureaksi. Urean ja ammoniakkin massojen suhde on kuvattu kaavoissa 10 ja 11. 105 kg ureaa on muuttunut isosyaanihapoksi ja on liittynyt selluloosan hydroksyyliiryhmiin.

$$(n) \text{ Urea} = \frac{120\,000 \text{ (g)}}{60,6 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = 1980,198019 \text{ (mol)} = (n) \text{ NH}_3 \quad (\text{kaava 10})$$

$$(m) \text{ NH}_3 = (1980,198019 \text{ (mol)})(17,031 \text{ (g/mol)}) = 33724,7\text{g} \approx 34 \text{ kg NH}_3 \quad (\text{kaava 11})$$

Karkeasuodatuksessa urea (105 kg) poistuu kiteytyneenä, eikä palaa enää kiertoon. Urean kokonaiskulutukseksi CCA 2-prosessissa on merkitty 105 kg. Urea on lisätty SULCA 5.0:ssa Karbamoinnin input-tietoihin.

Na₂SO₄ lisätään CCA:n 1 kehuukylpyyn 251 kg. Kierto on palautuu 220 kg. 31 kg kiteytyy eikä pala kierto, joten SULCA 5.0:ssa CCA 2-valmistusprosessin kehuukylvyn input-tietoihin on merkitty 31 kg Na₂SO₄.

H₂SO₄:a lisätään 1157 kg osaprosessissa Metallien poisto ja tästä määrästä 926 kg palautuu kierto. Pesuun IV kulkeutuu 231 kg H₂SO₄:a ja tästä määrästä palaa kierto 185 kg. 46 kg H₂SO₄:a jatkaa pH:n säätöön, jossa se neutraloidaan eli hävikki tässä vaiheessa on 46 kg. Seuraavaksi H₂SO₄:a lisätään kehuukylvyssä 1135 kg, josta kaikki reagoivat suolaksi. Yhteishävikki on 1181 kg. SULCA 5.0:ssa tämä on merkitty siten, että pH:n säädön input-tietoihin on merkitty 46 kg ja Kehruukylvyn 1135 kg.

H₂O₂:a lisätään CCA:ssa 1 41 kg Peroksidi-käsittelyssä. Lisätystä määrästä 10 kg palautuu kierto. 31 kg jatkaa osaprosessiin Pesu III ja sen jälkeen osaprosessiin Pesu I. Oletettavasti 31 kg palautuu kierto Pesun I jälkeen. Seuraavan kerran H₂O₂:a lisätään Karbamoinnissa 26 kg, josta 4 kg palaa kierto. 22 kg H₂O₂:sta muodostuu happea kaavojen 12 ja 13 mukaan. Hävikiksi merkitään SULCA 5.0:ssa 22 kg Karbamoinnin input-tietoihin.

$$(n) \text{H}_2\text{O}_2 = \frac{22000 \text{ (g)}}{34,0147 \text{ (g/mol)}} = 646,77918 \text{ (mol)} = (n) \text{O}_2 \quad (\text{kaava 12})$$

$$(m) \text{O}_2 = 15,9994 \text{ (g/mol)}(646,77918 \text{ (mol)}) = 10348 \text{ g} \approx 10 \text{ kg} \quad (\text{kaava 13})$$

ZnO lisätään kehuuliukseen, jossa se reagoi ZnSO₄:ksi, eikä enää palautu kierto ZnO:na. SULCA 5.0:ssa liuotuksen input-tietoihin on merkitty 171 kg ZnO:a.

Al₂SO₄:a lisätään kehuuliukseen 251 kg ja se jää liukseen. Se saattaa vain kiteytyä ajan mittaan ja siksi noin 50 kg olisi hyvä lisätä 1000 kg CCA-kuitua kohti.

Lämpöenergiaa (GJ) ja sähkönkulutus (MWh) lasketaan samalla tavalla, kuin CCA:ssa 1.

Prosessivettä (vesi sisään/ulos) poistuu kehruliuksesta 5907 kg ja loppukuivauksesta 5886 kg. Yhteensä vettä poistuu 11793 kg ($5907 + 5886 = 11793$ kg), josta muodostuu CCA:n 2 prosessiveden kulutus.

Pesuvettä (vesi / pesu) poistuu osaprosesseista Metallinpoisto 10980 kg ja Pesu IV 3538 kg. Yhteenlaskettuna nämä muodostavat CCA:n 2 pesuveden kulutuksen, joka on 14518 kg. SULCA 5.0:ssa Metallinpoiston input-tietoihin on merkitty 10980 kg ja Pesun IV 3538 kg.

Jäähdytysveden (vesi / jäähdytys) kulutus CCA:ssa 1 koostuu 10900 kg vedestä, joka kiertää osaprosessien Reaktio, Jäähdytys ja Liuotus välillä. Tästä vesimäärästä poistuu aina 3500 kg. Jäähdytysvedenkulutus CCA:ssa 2 tulee olemaan tämä poistuneen veden määrä 3500 kg. SULCA 5.0:ssa tapahtuma mallinnetaan siten, että liuotuksen input-tietoihin merkitään 3500 kg. CCA:n 2 kokonaiskulutus ja tase on esitetty taulukossa 41.

Taulukko 41. CCA 2 kokonaiskulutus ja tase

1000 kg CCA 2	Input	Output	Tase Input - Output
Poistopuuvilla sisään CCA ulos (kg)	1254	1000	254
Urea (kg)	105	0	105
NaOH (kg)	961	0	961
H ₂ O ₂ (kg)	22	0	22
H ₂ SO ₄ (kg)	1181	0	1181
ZnO (kg)	171	0	171
Na ₂ SO ₄ (kg)	31	0	31
Al ₂ SO ₄ (kg)	50	0	50
Viimeistelykemikaalit (kg)	48	48	0
1000 kg CCA 2 energia	Input	Output	Tase
Energia, (GJ)	20,94	0	20,94
Sähkö, (MWh)	0,5268	0	0,5268
1000 kg CCA 2 vesi	Input	Output	Tase
Vesi sisään/ulos (kg)	11793	0	11793
Vesi / pesu (kg)	14531	0	14531
Vesi / jäähditys (kg)	3500	0	3500

7.3 CCA 3

Tämä inventaari tehtiin prosessille, jossa NaOH:n ja H₂SO₄:n kuluneesta määrästä saadaan palautettua kiertoon 80 % elektrodialyysin avulla. Näin NaOH:n ja H₂SO₄:n kulutus olisi vain 20 % verrattuna CCA:ssa 2. Sähkönkulutus kuitenkin kasvaa elektrodialyysin seurauksena, joten vertailu tehtiin, jotta nähdään, onko kemikaalien palautus kannattavaa sähkönkulutuksen kasvaessa. Tase tehtiin muuten samalla tavalla, kuin CCA:lle 2, mutta eroavaisuuksia on NaOH:n, H₂SO₄:n ja sähkönkulutuksessa.

Kaikki vaiheet poistopuuviillasta CCA-kuiduksi on mallinnettu silikaattienpoistosta paalaukseen samalla tavalla, kuin CCA:ssa 1.

NaOH muuttuu kehruulioksessa natriumsulfaatiksi rikkihapon kanssa, mutta suola voidaan hajottaa elektrodialyysillä takaisin NaOH:ksi ja H₂SO₄:ksi. Tällä menetelmällä kuluneesta NaOH-liuoksesta saadaan palautettua 80 % takaisin kiertoon eli kehruulioksessa kuluu NaOH:a 185 kg ($923 \text{ kg} * (1-0,8) = 185 \text{ kg}$), joka lisätään Liuotuksen input-tietoihin. SULCA 5.0:ssa CCA:n 3 NaOH:n kulutukseksi lasketaan pH:n säädössä kuluneen NaOH:n (38 kg) ja liuotukseen lisättävän NaOH:n (185 kg) summa, joka on 223 kg ($38 + 185 = 223 \text{ kg}$).

Metallien poistoon lisätään 1157 kg H₂SO₄:a ja tästä määrästä poistuu 926 kg kiertoon. 231 kg jatkaa Pesuun IV, jossa 185 kg lähtee kiertoon. 46 kg H₂SO₄:a jatkaa pH:n säätöön, jossa se neutraloidaan NaOH:lla eli H₂SO₄:n hävikki tässä vaiheessa on 46 kg. Seuraavaksi H₂SO₄:a lisätään kehruukylpyyn 1135 kg, josta kaikki reagoivat suolaksi NaOH:n kanssa. Suolasta pystytään palauttamaan H₂SO₄:ksi takaisin kiertoon 80 % elektrodialyysin avulla. H₂SO₄:a kuluu kehruukylvyssä 227 kg ($1135 * (1-0,8) = 227 \text{ kg}$). Kokonaiskulutus CCA:n 3 H₂SO₄:lle on 273 kg ($46 + 227 = 273 \text{ kg}$). SULCA 5.0:ssa pH:n säädön input-tietoihin merkitään 46 kg H₂SO₄:a ja Kehruukylvyn input-tietoihin 227 kg.

Energiankulutus (GJ) lasketaan samalla tavalla, kuin CCA:ssa 1.

Sähkökulutus (MWh): Liuotuksen jälkeisessä Jäähdytys osaprosessissa tarvitaan sähköä 0,5268 MWh. Elektrodialyysi kuluttaa sähköä 1,42 MWh/1000 kg NaOH:a kohti ja NaOH:a lisätään kehruuliokseen 923 kg. Sähkökulutus on tällöin 1,3 MWh kaavan 14 mukaan. Kehruuliokseen lisätään 1135 kg H₂SO₄:a ja sen palautukseen elektrodialyysissä kuluu 1,62 MWh / 1000 kg H₂SO₄:a kohti. Kulunut sähkö on H₂SO₄:n osalta 1,84 MWh kaavan 15 mukaan. Elektrodialyysin sähkökulutus koostuu NaOH:n ja H₂SO₄:n suolan hajottamiseen kuluneen sähkön summasta eli 3,14 MWh:sta. 1000 kg:n CCA:n valmistamiseen tarvittava sähkön kokonaismäärä on 3,6268 MWh, joka koostuu jäähdytykseen ja elektrodialyysiin käytetyn sähkön summasta. SULCA 5.0:ssa 0,5268 MWh lisätään jäähdytyksen input-

tietoihin ja 3,1 MWh lisätään Kehruuhauteen input-tietoihin. CCA:n 3 kokonaiskulutus ja tase on esitetty taulukossa 42.

$$0,923 \text{ t NaOH} * 1,42 \text{ MWh} = 1,3 \text{ MWh}$$

(kaava 14)

$$1,135 \text{ t} * 1,62 \text{ MWh} = 1,84 \text{ MWh}$$

(kaava 15)

Taulukko 42. CCA 3:n kokonaiskulutus ja tase

1000 kg CCA 3	Input	Output	Tase Input - Output
Poistopuuvilla sisään CCA ulos (kg)	1254	1000	254
Urea (kg)	105	0	105
NaOH (kg)	223	0	223
H ₂ O ₂ (kg)	22	0	22
H ₂ SO ₄ (kg)	273	0	273
ZnO (kg)	171	0	171
Na ₂ SO ₄ (kg)	31	0	31
Al ₂ SO ₄ (kg)	50	0	50
Viimeistelykemikaalit (kg)	48	48	0
1000 kg CCA 3 energia	Input	Output	Tase
Energia, (GJ)	20,94	0	20,94
Sähkö, (MWh)	3,6268	0	3,6268
1000 kg CCA 3 vesi	Input	Output	Tase
Vesi sisään/ulos (kg)	11793	0	11793
Vesi / pesu (kg)	14531	0	14531
Vesi / jäähditys (kg)	3500	0	3500

7.4 Inventaarierien vertailu

Suurimmat erot kolmella tarkasteltavalla prosessilla ovat NaOH:n, H₂SO₄:n ja sähkön kulutuksen välillä. NaOH:n kulutus vähenee kemikaalien tehokkaalla kierrätyksellä ja NaOH:n kulutus on pienentynyt 36 % CCA:ssa 2, jos vertaa CCA:an 1. CCA 3 tarvitsee kaikista vähiten NaOH:a elektrodialyysin ansiosta ja siksi CCA 3 kuluttaa NaOH:a CCA:an 2 verrattuna 77 % vähemmän. Ero eniten kuluttaneen prosessin CCA:n 1 ja vähiten kuluttaneen prosessin välillä on 85 %.

Rikkihapon kulutus pienenee huomattavasti CCA:an 2 ja CCA:an 3 siirryttäessä. Kemikaalien kierrolla saadaan vähennettyä rikkihapon kulutusta eli CCA 2-prosessissa tarvitaan 48 % vähemmän rikkihappoa CCA 1-prosessiin verrattuna. CCA 3-prosessissa rikkihappoa tarvitaan puolestaan 77 % vähemmän kuin CCA 2:ssa ja 88 % vähemmän kuin CCA:ssa 1 johtuen elektrodialyysistä.

Sähkönkulutus puolestaan kasvaa CCA 3-prosessissa 585 % CCA:an 1 ja CCA:an 2 verrattuna. Elektrodialyysin osuus CCA:n 3 kokonaissähkönkulutuksesta on 87 %. CCA:n 1, CCA:n 2 ja CCA:n 3 inventaarierien input-tiedot ovat esitettyinä taulukossa 43.

Taulukko 43. CCA:n 1, CCA:n 2 ja CCA:n 3 inventaarien input-tiedot

1000 kg CCA	CCA 1 input	CCA 2 input	CCA 3 input
Poistopuuvilla (kg)	1254	1254	1254
Urea (kg)	225	105	105
NaOH (kg)	1494	961	223
H ₂ O ₂ (kg)	67	22	22
H ₂ SO ₄ (kg)	2292	1181	273
O ₃ (kg)	15	0	0
ZnO (kg)	171	171	171
Na ₂ SO ₄ (kg)	250	31	31
Al ₂ SO ₄ (kg)	250	50	50
Peretikkahappo (kg)	280	0	0
Viimeistelykemikaalit (kg)	48	48	48
1000 kg CCA 1 energia	CCA 1 input	CCA 2 input	CCA 3 input
Energia, (GJ)	20,94	20,94	20,94
Sähkö, (MWh)	0,5268	0,5268	3,6268
1000 kg CCA 1 vesi	CCA 1 input	CCA 2 input	CCA 3 input
Prosessivesi (m ³)	50	12	12
Pesuvesi (m ³)	25	15	15
Jäähdytysvesi (m ³)	11	4	4

8 LCI- ja GWP-arvot

SULCA 5.0:aan mallinnetut kokonaiset CCA-prosessit jaetaan esikäsittelyyn, pääprosessiin sekä kehuuseen ja nämä osiot kopioidaan sekä siirretään omille välilehdilleen. Esikäsittelyn, pääprosessin ja kehuun välilehdistä tehdään omat tiedostot eli agglomeraatit. Esikäsittelyn, pääprosessin ja kehuun agglomeraatit siirretään samalle välilehdelle ja jokaiselle prosessiin syötettävälle aineelle haetaan LCI-tiedot Ecoinvent 3.3:sta. LCI-tiedot sisältävät kaikki kemikaalit ja muut luonnonvarat, jotka ovat kuluneet 1 kg ainetta vastaavan määrän. Tietojen sisältämät ainemäärät kerrotaan CCA-prosessien inventaareihin syötettyjen aineiden määrällä (kg) ja näistä tiedoista koostuu CCA:n lopullinen LCI. Ecoinvent 3.3:sta haetut LCI-tiedot ja niihin liitettävät kemikaalit ovat esitettynä taulukossa 44.

Taulukko 44. Ecoinvent-tietoihin liitettävät kemikaalit

Ecoinvent 3.3-tieto	Liitetään LCI:ssä
Market for diesel, low-sulfur, CH	Biodiesel
Electricity, Finland, 2007-2011	Sähkö
Market for hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state, GLO	H ₂ O ₂
Market for ozone, liquid, RER	O ₃
Heat Fin	Energia (Lämpö sellutehtaalta)
Acetic acid production, product in 98 % state, RER	Peretikkahappo. Peretikkahapolle ei löytynyt Ecoinvent 3.3:sta vastaavaa LCI-tietoa, joten tiedoksi valittiin etikkahappoa koskevat tiedot.
Ethoxylated alcohol (AE3) production, coconut oil, RER	Viimeistelykemikaali
Market for aluminium sulfate, powder, GLO	Al ₂ SO ₄
Market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO	NaOH
Market for sodium sulfate, anhydride, RER	Na ₂ SO ₄
Market for sulfuric acid	H ₂ SO ₄
Market for urea, as N, GLO	Urea
Market for zincoxide, GLO	ZnO

8.1 Lajittelu

Laskennassa oletetaan, että poistotekstiili tulee paikan C₁, C₂ ja C₃:n lajittelukeskuksiin ja puuvillatekstiili (1267 kg) erotellaan muista materiaaleista T4T consortium-laitteella, joka on erikoistunut tekstiilien tunnistamiseen ja lajitteluun. Laitteen sähkönkulutusta ei ilmoitettu missään lähteessä suoraan, joten lajitteluun kulunut sähkö 1267 kg:lle puuvillaa arvioitiin seuraavasti: T4T consortium kuluttaman sähkön hinta Hollannissa vuonna 2012 oli yhtä tekstiilikiloa kohti 0,005 €, jolloin sähkön hinta 1267 kg:lle puuvillaa oli 6,335 €^[74]. Sähkön

hinta teollisuudelle vuonna 2012 Hollannissa oli 97 €/MWh ^[75]. Näiden tietojen perusteella T4T consortiumin sähkönkulutukseksi saadaan 65 kWh kaavan 16 mukaan.

$$\frac{6,335 \text{ €}}{97 \text{ €/MWh}} = 0,06530927 \text{ MWh} \approx 65 \text{ kWh} \quad (\text{kaava 16})$$

Puuvillan tunnistuksen jälkeen se revitään silpuksi. Tekstiilin silppuamiseen käytettyä laitetta ei ole eritelty työtä varten, joten myllyn kuluttama sähkö arvioitiin lähteen ^[76] mallin N16x48 mukaan. Tunnin aikana kyseinen silppuri käsittelee tekstiiliä noin 400 kg ja kuluttaa sähköä 30 kW. Silppuriin syötetään 1267 kg poistopuuvillaa ja silppurin kuluttamaksi sähkömääräksi saadaan kaavan 17 mukaan 95 kWh. Lajitteluun ja silppuamiseen käytetyn energian summa on tällöin 160 kWh. Silppuamisen seurauksena 13 kg nappeja ja vetoketjuja poistetaan. Jäljelle jäävä poistopuuvilla painaa tällöin 1254 kg ja tämä massa kuljetetaan tehtaalle, joka sijaitsee paikassa A tai B.

$$\left(\frac{1267 \text{ kg}}{400 \text{ kg}} \right) * 30 \text{ kWh} = 95,025 \approx 95 \text{ kWh} \quad (\text{kaava 17})$$

Lajittelua koskevat tiedot SULCA 5.0:ssa ovat samat paikassa A ja B. Kahden sijainnin erona on keskimääräisen matkan pituus tehtaalle ja kuljetukseen käytetty kulkuväline sekä energianlähde. Kuljetusmatkat poistopuuvillalle määritettiin siten, että paikan C₁, C₂ ja C₃ lajittelukeskusten matkat laskettiin määränpähän ja matkojen pituuksista laskettiin keskiarvo. Kuljetus asetettiin SULCA 5.0:ssa muodostamalla ensin yhteys lajittelun ja esikäsittelyn välille. Yhteyden muodostuttua, valittiin haluttu kulkuväline transport-valikosta ja lisättiin kuljetusmatkan pituus kilometreinä. Lajittelun input- ja output-tiedot ovat esitettyinä SULCA 5.0:ssa taulukon 45 mukaan.

Taulukko 45. Lajittelu

Yhdiste	Input kg	Output kg	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3-tieto
Poistopuuvilla	1267	1254	13	-
Energia MWh	0,16		0,16	Heat Fin

8.2 Kuljetus

Sijainti A: 1254 kg poistopuuvillaa kuljetetaan CCA-tehtaalle rekalla, joka käyttää dieseliä polttoaineena. Rekan polttoaineenkulutus laskettiin Ecoinvent 3.3 LCI-tiedolla, joka on esitetty taulukossa 46. Ajomatka C₁-A 255 km, C₂-A on 91 km ja C₃-A 142 km. Keskimääräiseksi kuljetusmatkaksi asetettiin 163 km kaavan 18 mukaan.

$$\text{Kuljetusmatka A} = \frac{91 \text{ km} + 255 \text{ km} + 142 \text{ km}}{3} \approx 163 \text{ km} \quad (\text{kaava 18})$$

Sijainti B: 1254 kg poistopuuvillaa kuljetetaan CCA-tehtaalle tavarajunalla, joka käyttää sähköä energianlähteenä. Matkaan kulunut sähkö laskettiin Ecoinvent 3.3 LCI-tiedolla, joka on esitetty taulukossa 46. Matkan pituus C₁-B on 508 km, C₂-B 616 km ja C₃-B 371 km ^[77]. Keskimääräiseksi kuljetusmatkaksi asetettiin 498 km kaavan 19 mukaan.

$$\text{Kuljetusmatka B} = \frac{508 \text{ km} + 371 \text{ km} + 616 \text{ km}}{3} \approx 498 \text{ km} \quad (\text{kaava 19})$$

Taulukko 46. Kuljetus

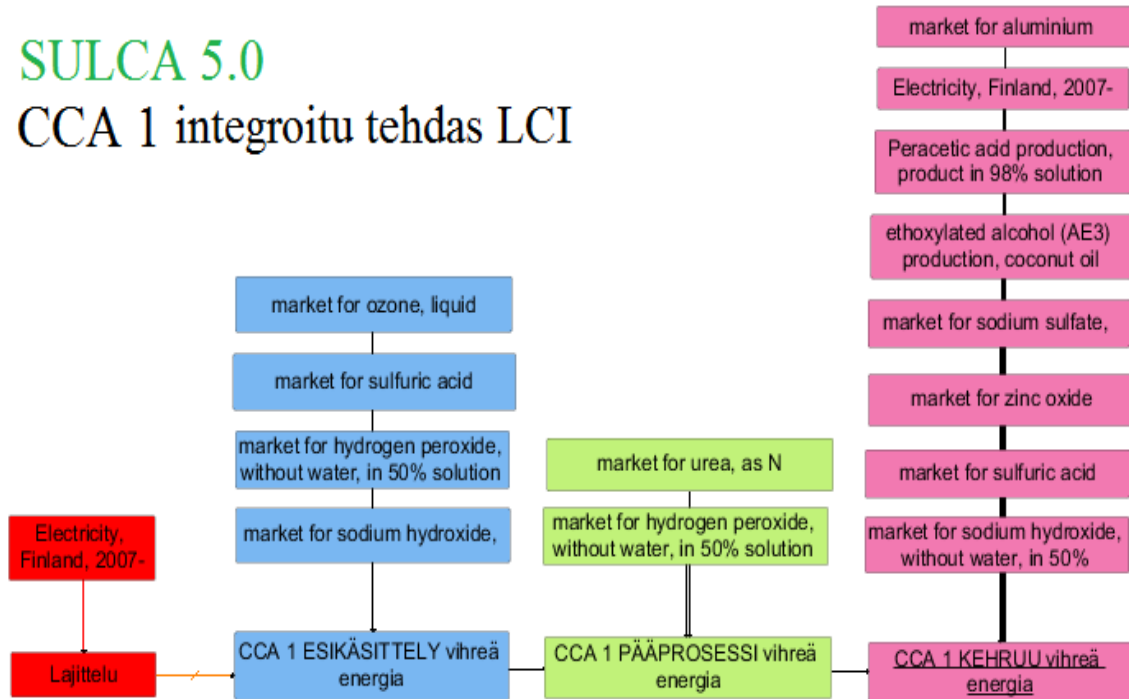
Vaihtoehto	Ajoneuvo	Kuljettu matka km	Liitettävä Ecoinvent 3.3-tieto
A	Rekka	163	Market for transport, freight, lorry, 7,5-16 metric ton, EURO6, GLO
B	Tavarajuna	498	Market for transport, freight train, Europe without Switzerland.

8.3 CCA 1

CCA 1-tehtaalle tehtiin LCI:t tilanteissa, joissa CCA 1-prosessi on integroituna sellutehtaaseen ja CCA 1-prosessi toimii ilman integrointia. Näille molemmille tehdastyypille on laskettu GWP-arvot (kg CO₂ ekv.). Integroitu tehdas saa lämpöenergiansa sellutehtaalta kuorikattilaan lisättävästä biomassasta, joten lämmön tuotosta syntyvien CO₂-päästöjen katsotaan olevan biogeenisiä. GWP-arvoihin lasketaan vain fossiilisista polttoaineista syntyneet CO₂-päästöt, joten integroidun tehtaan lämpöenergiaa ei oteta huomioon laskuissa. Yksin toimiva CCA-tehdas joutuisi käyttämään kaupallista lämpöenergiaa. Integroitu ja yksin toimiva tehdas käyttävät kaupallista sähköä. Integroidun tehtaan LCI SULCA 5.0:ssa on esitetty kuvassa 31 ja yksin toimivan CCA-tehtaan LCI on esitetty kuvassa 32. Ainoana erona näiden kahden LCI:ssa on lämpöenergia. Yksityiskohtaiset tiedot CCA:n 1 esikäsittelyn agglomeraatista on esitetty liitteessä 1, taulukossa 1. Pääprosessin agglomeraatin tiedot on esitetty liitteessä 2, taulukossa 1 ja kehuun agglomeraatin tiedot on esitetty liitteessä 3, taulukossa 1. Liitteiden agglomeraatit sisältävät yksin toimivan tehtaan LCI-tiedot, koska niissä on lämpöenergia mukaan laskettuna. Integroidun tehtaan agglomeraatit ovat muuten samat tiedoltaan, mutta lämpöenergiaa ei ole otettu huomioon laskuissa.

SULCA 5.0

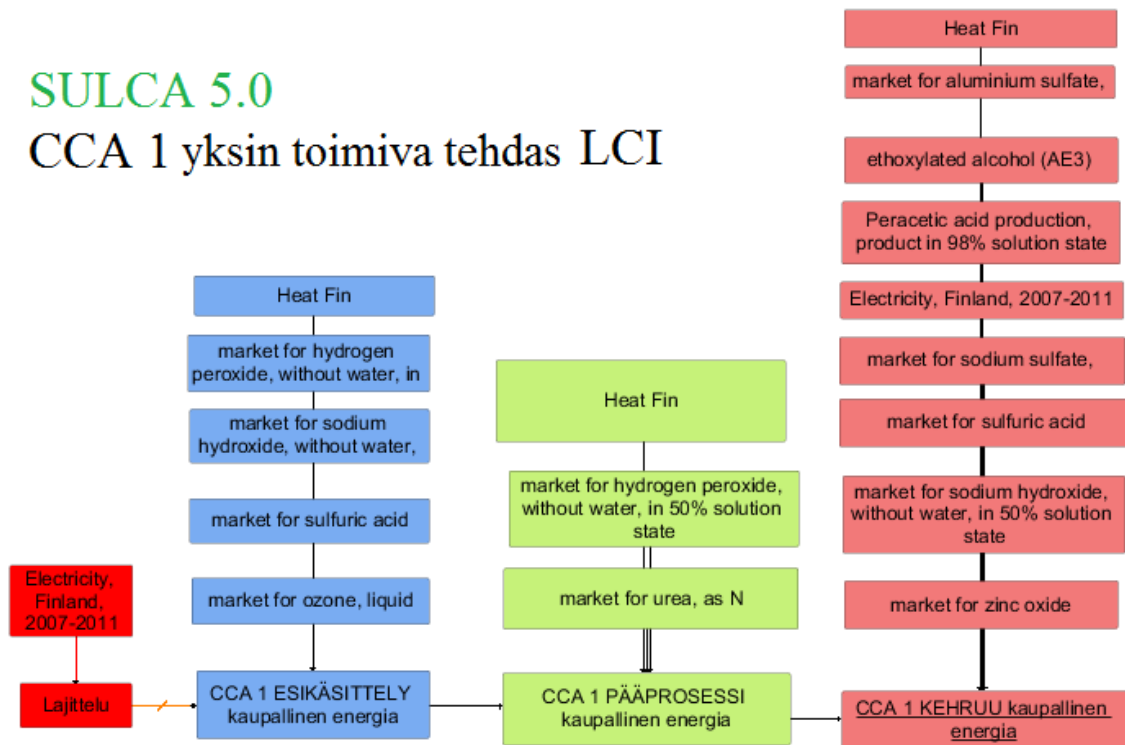
CCA 1 integroitu tehdas LCI



Kuva 31. CCA 1 Integroitu tehdas SULCA 5.0.

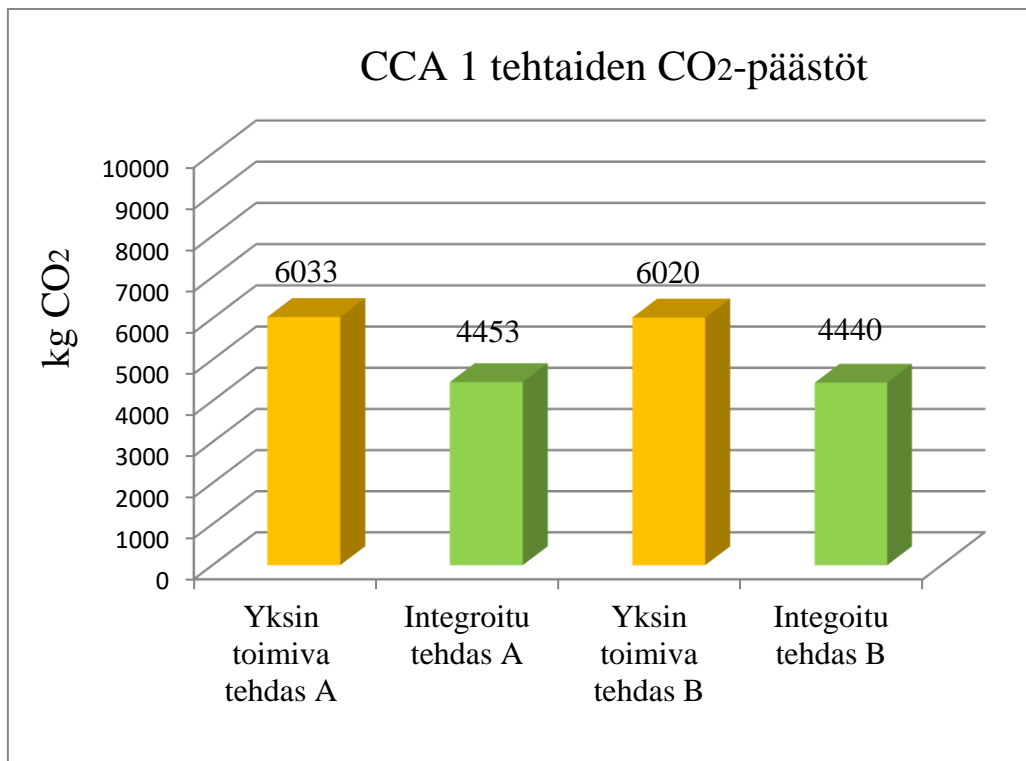
SULCA 5.0

CCA 1 yksin toimiva tehdas LCI

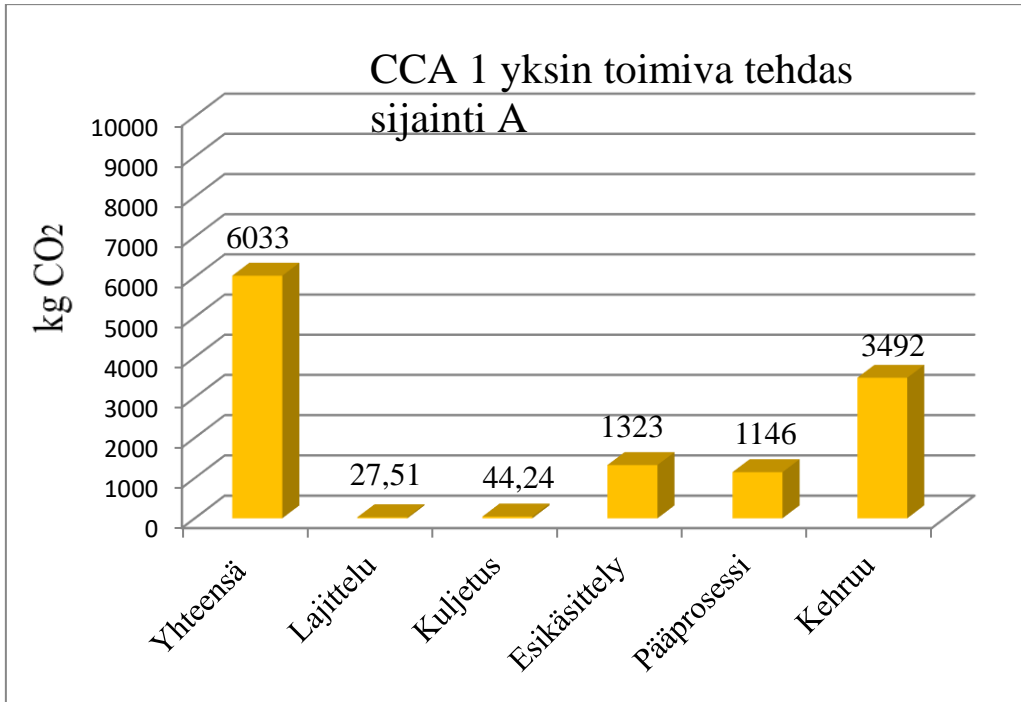


Kuva 32. CCA 1 yksin toimiva tehdas SULCA 5.0.

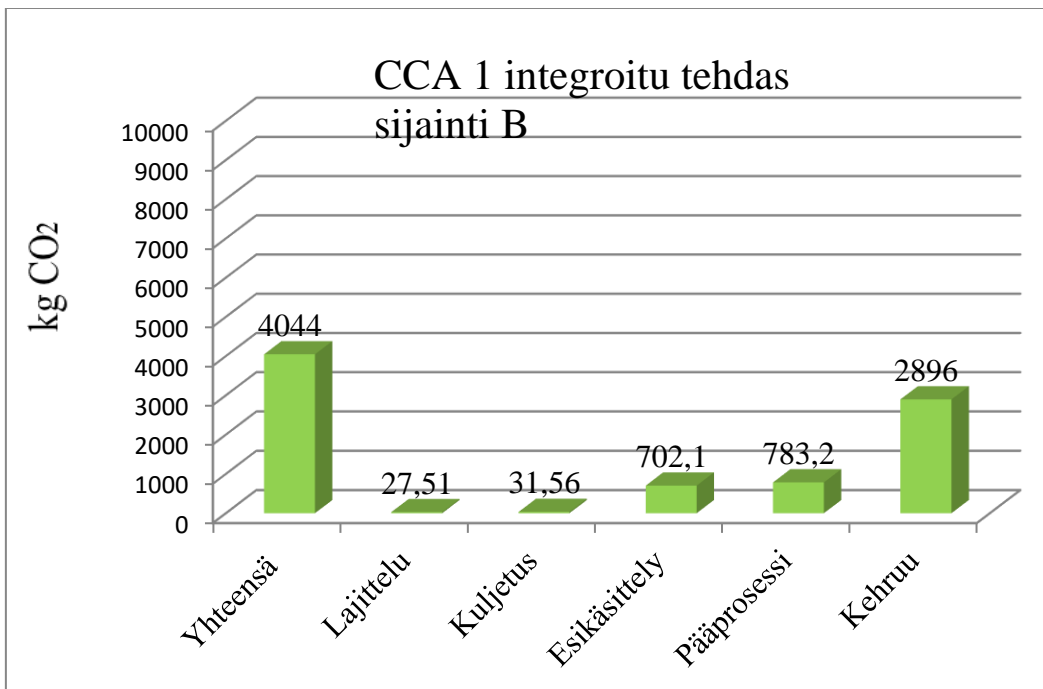
GWP-arvot laskettiin ReCiPe Midpoint H-vaikutusarviointimenetelmällä ja tuloksista tehtiin GWP-diagrammit. Kaikkien CCA 1-tehdasmallien GWP-arvot ovat esitettynä kuvassa 33. CCA:n 1 tuloksista suurimmat CO₂-päästöt (6033 kg CO₂) sai yksin toimiva CCA-tehdas, joka sijaitsee paikassa A ja pienimmät päästöt (4440 kg CO₂) tulivat integroidusta tehtaasta, joka sijaitsee paikassa B. Kuvissa 34 ja 35 on esitetty CCA 1-valmistusprosessin kokonaispäästöt ja miten päästöt ovat jakautuneet lajittelun, kuljetuksen, esikäsittelyn, pääprosessin ja kehruprosessin kesken yksintoimivan tehtaan (kuva 34) ja integroidun tehtaan (kuva 35) osalta. SULCA 5.0:ssa lasketut alkuperäiset CCA 1 GWP-diagrammit ovat esitettynä liitteissä. Paikkaan A sijoitettujen CCA 1 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 4, kuvassa 1 ja integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 5, kuvassa 1. Paikkaan B sijoitettujen CCA 1 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 6, kuvassa 1 ja integroidun CCA 1-tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 7, kuvassa 1. Eniten ja vähiten saastuttavan tehdasmallin erotus on 1593 kg CO₂, kun muuttujina ovat lämpöenergian laatu sekä tehtaan sijainti.



Kuva 33. CCA 1-tehdasmallien GWP-arvot.



Kuva 34. CCA 1 yksin toimivan tehtaan GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 35. CCA 1 integroidun tehtaan GWP-diagrammi paikassa B.

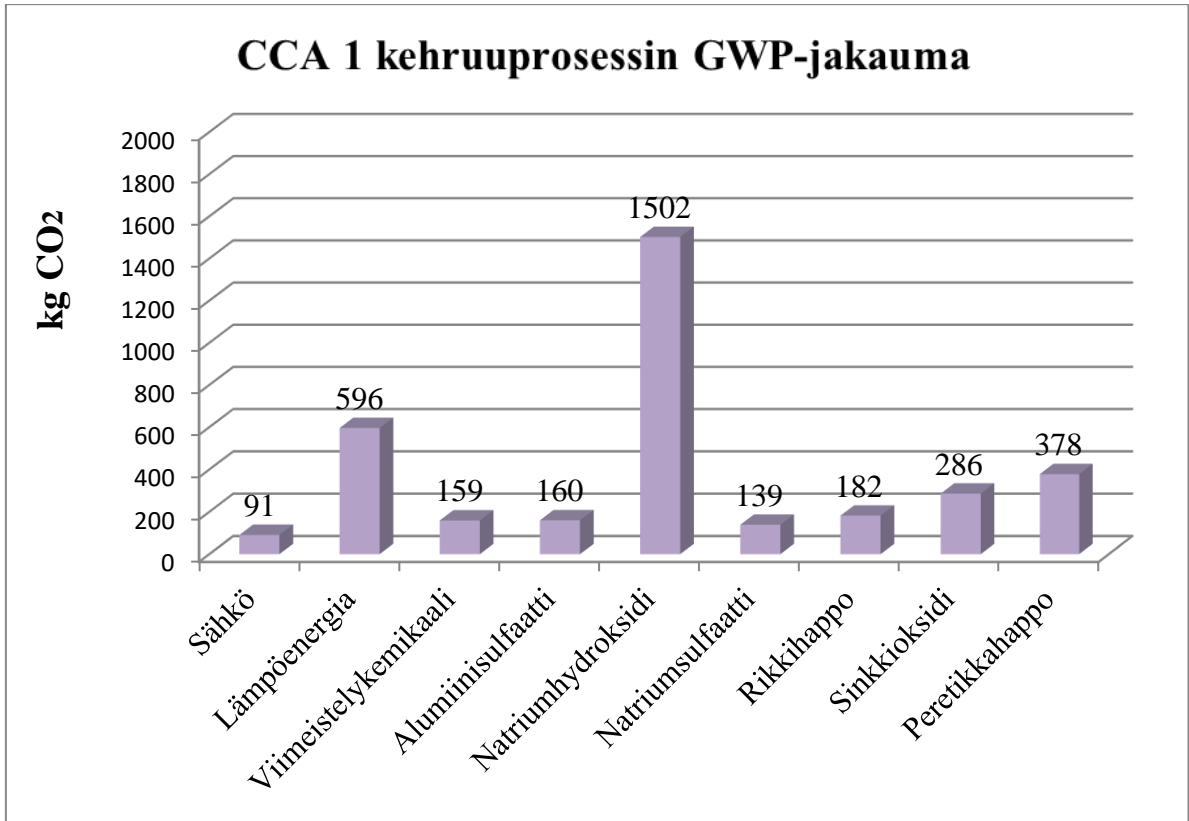
Kaikkien CCA 1-tehdasmallien vaiheittaiset CO₂-päästöt on esitetty taulukossa 47. Lajittelusta aiheutuvat päästöt ovat samat kaikille prosesseille ja kuljetuksien A ja B päästöt eroavat n. 13 kg CO₂:lla toisistaan. Yksin toimiva CCA-tehdas tuottaa 1580 kg enemmän

CO₂-päästöjä, kuin integroitu CCA 1-tehdas ja tähän on syynä yksin toimivan tehtaan tarvitsema kaupallinen lämpöenergia, joka koostuu osittain fossiilisista polttoaineista.

Taulukko 47. CCA 1 vaiheittaiset GWP-arvot

kg CO ₂ / t CCA-kuitua	CCA 1 yksin toimiva tehdas A kg CO ₂	CCA 1 integroitu tehdas A kg CO ₂	CCA 1 yksin toimiva tehdas B kg CO ₂	CCA 1 integroitu tehdas B kg CO ₂
Lajittelu	27,51	27,51	27,51	27,51
Kuljetus	44,21	44,21	31,56	31,56
Esikäsitely	1323	702,1	1323	702,1
Pääprosessi	1146	783,2	1146	783,2
Kehruuprosessi	3492	2896	3492	2896
Yhteensä	6033	4453	6020	4440

Suurimmat CO₂-päästöt tulevat kaikilta tehdasmalleilta kehruuprosessista. Kehruuprosessiin osallistuvien kemikaalien määrästä tehtiin GWP-diagrammi (CCA 1 sijainti A), joka on esitetty kuvassa 36 ja jakauman tarkemmat tiedot ovat esitetty taulukossa 48. Diagrammi tehtiin eniten päästöjä aiheuttaneesta tehdasmalista, koska siinä on esitetty tarkemmin energian ja kemikaalien suhde. Suurin vaikuttaja kehruuprosessin CO₂-päästöissä on NaOH, koska sitä tarvitaan tässä mallissa 1203 kg, joka on suuri määrä 1000 kg CCA-kuitua kohti. Taulukossa 48 on myös mainittuna kehruuprosessin aineiden osuudet kehruu- sekä kokonaisprosessista.



Kuva 36. CCA 1 kehruprosessin GWP-jakauma.

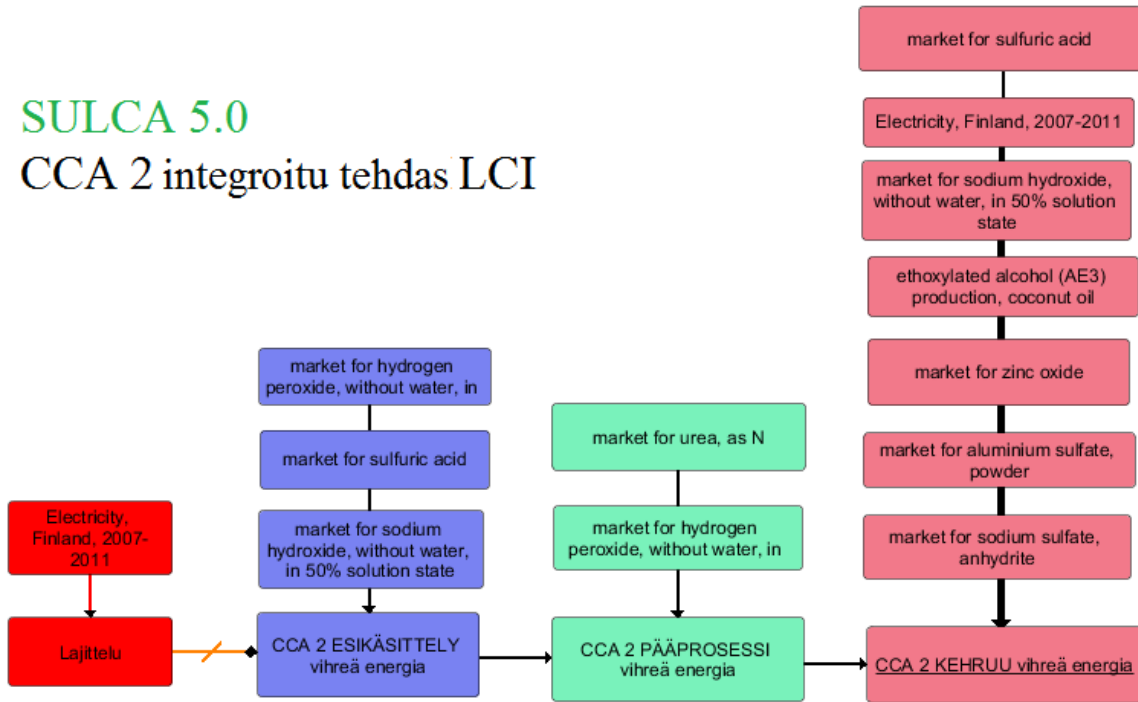
Taulukko 48. Kehruprosessin aineet ja määrät

Aine	Määrä	kg CO ₂	% kehru- prosessista 3492 kg CO ₂	% koko prosessista 6033 kg CO ₂
Sähkö (MWh)	0,5268	91	3	2
Lämpöenergia (MJ)	7,89	596	17	9
Viimeistelykemikaali (kg)	48	159	5	3
Alumiinisulfaatti (Al ₂ SO ₄) (kg)	251	160	5	3
Natriumhydroksidi (NaOH) (kg)	1203	1502	43	25
Natriumsulfaatti (Na ₂ SO ₄) (kg)	251	139	4	2
Rikkihappo (H ₂ SO ₄)(kg)	1135	182	5	3
Sinkkioksidi (ZnO) (kg)	171	286	8	5
Peretikkahappo	280	378	10	6
Yhteensä			100	58

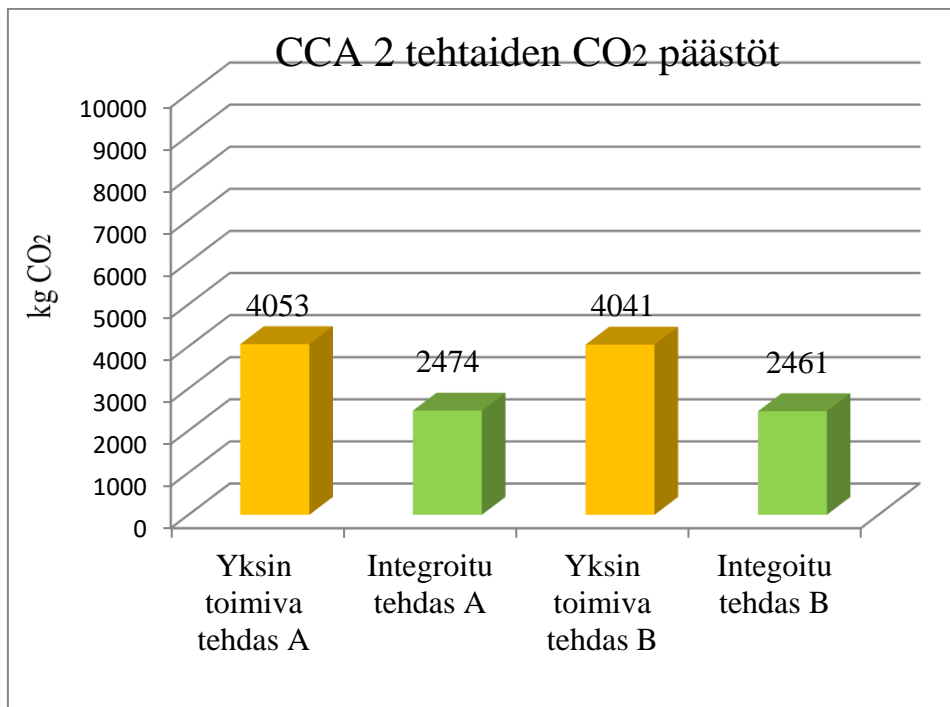
8.4 CCA 2

Inventaarin pohjalta koottu LCI-malli integroidulle CCA-tehtaalle on esitetty SULCA 5.0:ssa kuvan 37 mukaisesti. Yksin toimivan tehtaan LCI SULCA 5.0:ssa näyttää samalta, mutta agglomeraatteihin on kiinnitetty LCI-tieto kaupallisesta lämpöenergiasta. Yksin toimivan tehtaan SULCA 5.0 LCI on esitetty liitteessä 10, kuvassa 1. GWP-arvot laskettiin jokaiselle CCA 2-tehdasmallille ReCiPe Midpoint H-vaikutusarviointimenetelmällä ja tulokset on esitetty kuvassa 38. Tässäkin tapauksessa suurimman arvon sai yksintoimiva tehdas paikassa A (4053 kg CO₂) (kuvassa 39) sekä pienimmän päästöarvon integroitu tehdas paikassa B (2461 kg CO₂) (kuvassa 40). Näiden kahden tehdasmallin erotus on 1592 kg CO₂ ekv., kun muuttujana on käytetyn energian laatu ja tehtaan sijainti. Luku eroaa CCA:n 1 vastaavasta luvusta 1 kg:lla CO₂:a, mikä johtuu SULCA 5.0:n tekemästä pyöristyksestä. Yksityiskohtaiset tiedot CCA:n 2 esikäsittelyn agglomeraatista on esitetty liitteessä 8, taulukossa 1. Pääprosessin agglomeraatin tiedot on esitetty liitteessä 8, taulukossa 2 ja kehrun agglomeraatin tiedot on esitetty liitteessä 9, taulukossa 1. Liitteiden agglomeraatit sisältävät energiankulutusta koskevat tiedot. CCA 2-tehdasmallien alkuperäiset SULCA 5.0 GWP-diagrammit ovat esitettyinä liitteissä. Paikkaan A sijoitettujen CCA 2 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 11, kuvassa 1 ja integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 12, kuvassa 1. Paikkaan B sijoitettujen CCA 2 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 13, kuvassa 1 ja integroidun CCA 2-tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 14, kuvassa 1.

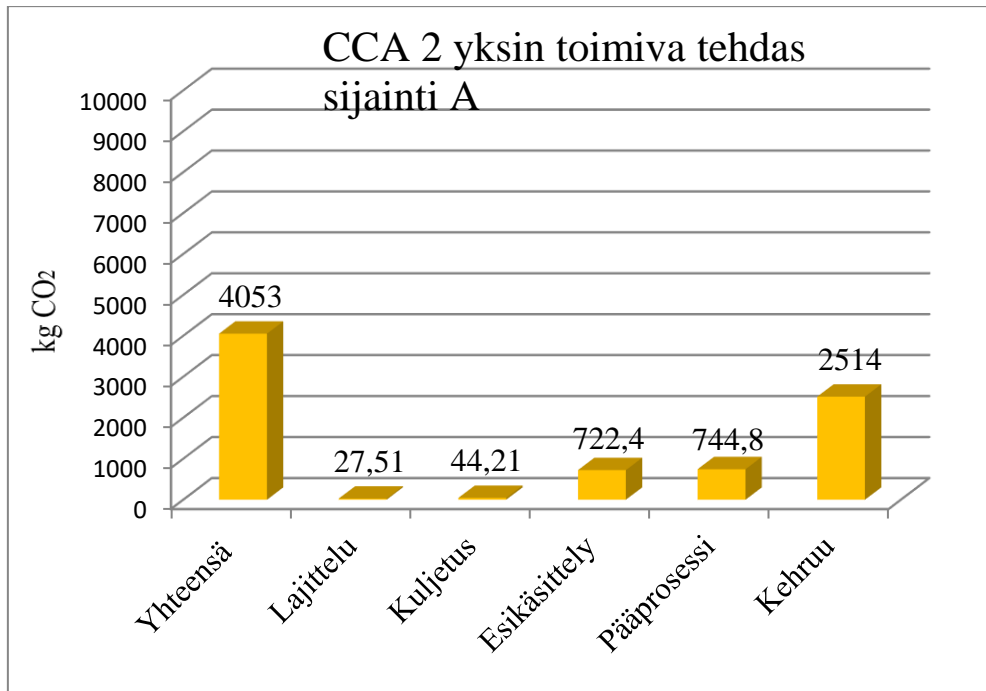
SULCA 5.0 CCA 2 integroitu tehdas LCI



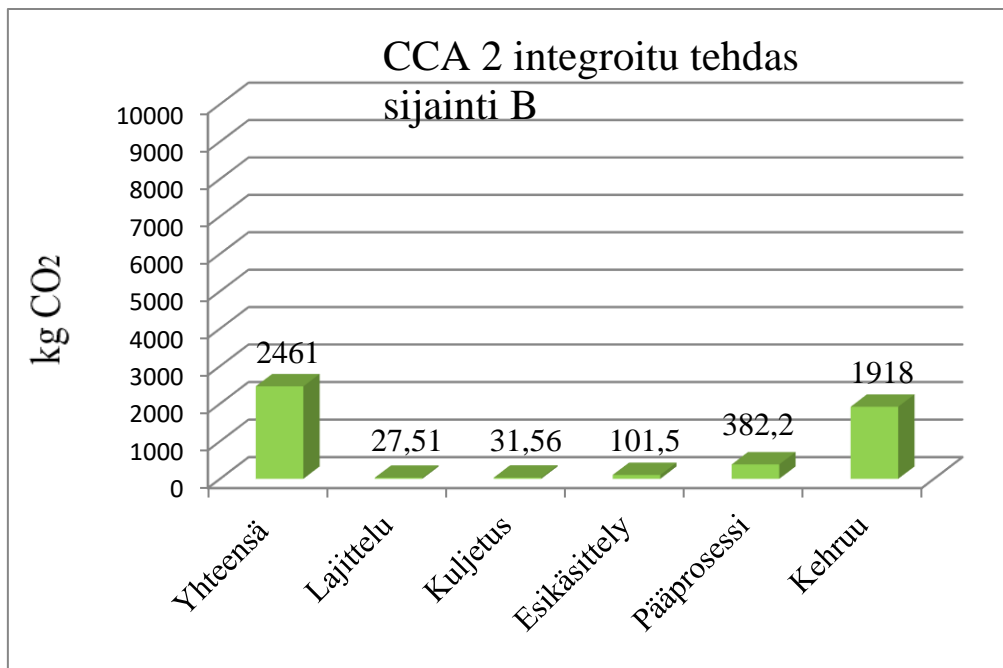
Kuva 37. SULCA 5.0 integroitu CCA 2-tehtaan LCI.



Kuva 38. CCA 2 GWP-arvot.



Kuva 39. CCA 2 yksin toimivan tehtaan GWP-arvot paikassa A.



Kuva 40. CCA 2 integroidun tehtaan GWP-arvot paikassa B.

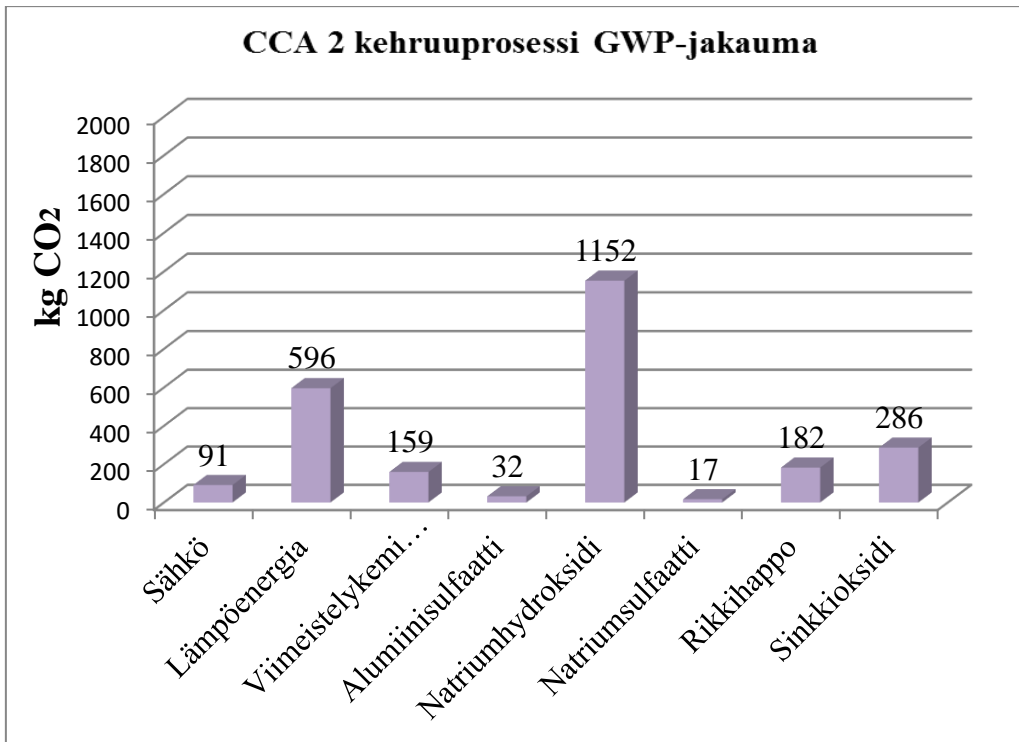
Kaikkien CCA 2-tehdasmallien vaiheittaiset CO₂-päästöt on esitetty taulukossa 49. Lajittelun ja sijaintien päästöt ovat samat, kuin CCA:lla 1, mutta esikäsittelyn, pääprosessin ja kehrun

CO₂-päästöt ovat pienentyneet CCA:an 1 verrattuna. Syynä pienempiin arvoihin ovat kemikaalien kulutuksen väheneminen.

Taulukko 49. CCA 2 GWP-arvot

kg CO₂ / t CCA-kuitua	CCA 2 yksin toimiva tehdas A kg CO₂	CCA 2 integroitu tehdas A kg CO₂	CCA 2 yksin toimiva tehdas B kg CO₂	CCA 2 integroitu tehdas B kg CO₂
Lajittelu	27,51	27,51	27,51	27,51
Kuljetus	44,21	44,21	31,56	31,56
Esikäsittely	44,21	101,5	44,21	101,5
Pääprosessi	744,8	382,2	744,8	382,2
Kehruuprosessi	2514	1918	2514	1918
Yhteensä	4053	2474	4041	2461

Myös CCA:n 2 tapauksessa suurimmat päästöt aiheutuvat kehruprosessista. Kehruprosessin GWP-jakauma on esitetty kuvassa 41 ja jakauman tarkemmat tiedot on koottu taulukkoon 50. Vaikka NaOH kulutusta saatiin vähennettyä 36 % CCA 1-prosessiin verrattuna, se on edelleen kehruprosessin pääasiallinen CO₂-päästöjen aiheuttaja, koska NaOH:n osuus kehruprosessista on 46 %. CCA:n 2 pääasiallinen NaOH:n kulutus johtuu saostumisesta suolaksi kehrukylvyssä.



Kuva 41. CCA 2 kehruprosessin GWP-jakauma.

Taulukko 50. CCA 2 kehruprosessin aineet ja määrät

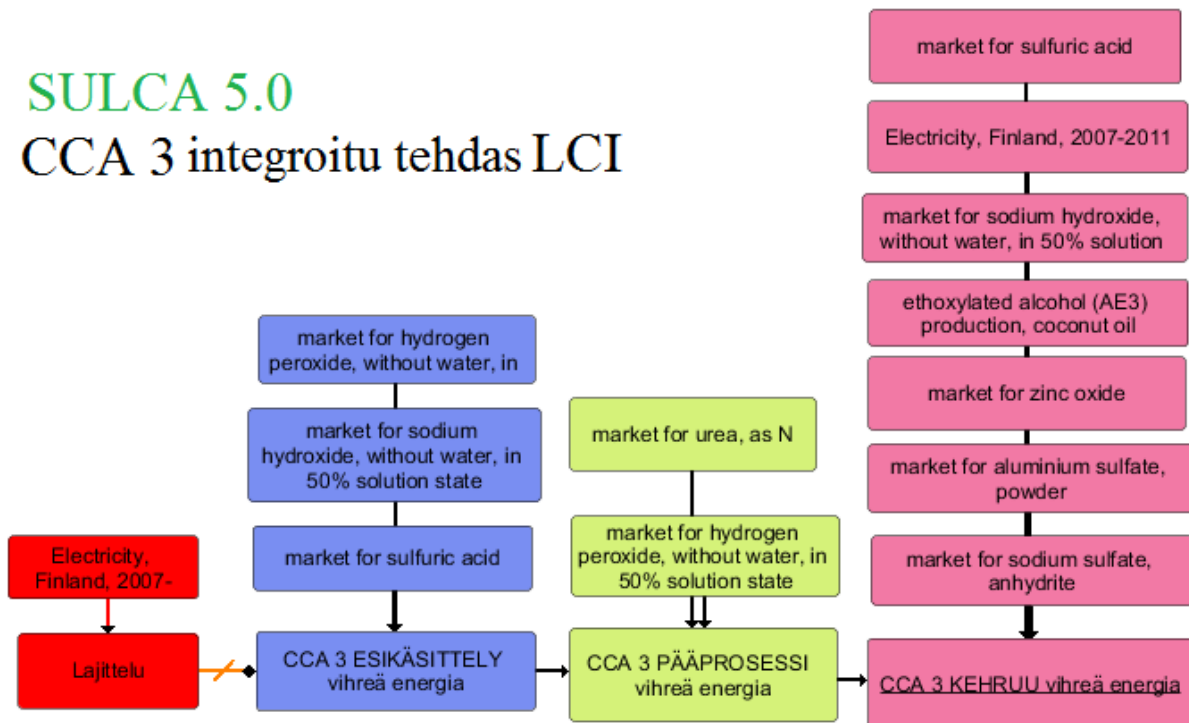
Aine	Määrä	kg CO ₂	% kehruu-prosessista 2514 kg CO ₂	% koko prosessista 4053 kg CO ₂
Sähkö (MWh)	0,5268	91	4	2
Lämpöenergia (MJ)	7,89	596	24	15
Viimeistelykemikaali (kg)	48	159	6	4
Alumiinisulfaatti (Al ₂ SO ₄) (kg)	51	32	1	1
Natriumhydroksidi (NaOH) (kg)	923	1152	46	28
Natriumsulfaatti (Na ₂ SO ₄) (kg)	31	17	1	0,5
Rikkihappo (H ₂ SO ₄)(kg)	1135	182	7	4
Sinkkioksidi (ZnO) (kg)	171	286	11	7
Yhteensä		2414	100	61,5

8.5 CCA 3

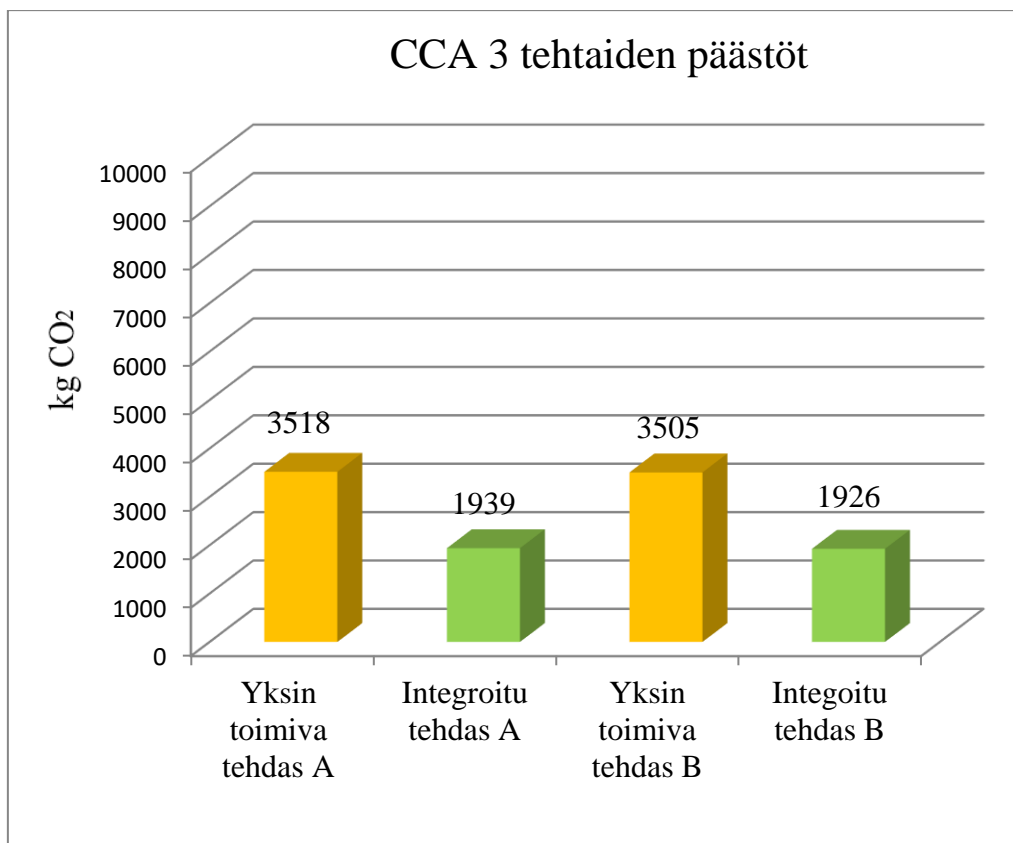
CCA:n 3-tehdasmalleissa kemikaalien kulutusta vähennetään palauttamalla NaOH:a ja H₂SO₄:a takaisin kiertoon elektrodialyysin avulla. Elektrodialyysiä sovelletaan tilanteessa, jossa NaOH ja H₂SO₄ ovat muodostaneet Na₂SO₄:n kehruoliuoksessa. CCA:n 2 ja CCA:n 3

tase on yhteneväinen lajittelun, esikäsitteilyn, ja pääprosessin osalta, mutta kehruuprosessissa on eroja, koska NaOH:n ja H₂SO₄:n menekit ovat pienemmät sekä sähkönkulutus on suurempi. Tämän syyn johdosta CCA:n 3 agglomeraateista on esitetty vain kehruuprosessin tiedot liitteessä 15, taulukossa 1. Kuvassa 42 on esitetty integroidun tehtaan CCA 3 LCI SULCA 5.0:ssa. Yksin toimivan tehtaan SULCA 5.0-malli on esitetty liitteessä 16, kuvassa 1. CCA:n 3 eri tehdasmallien CO₂-päästöt on esitetty kuvassa 43. Korkeimmat CO₂-päästöt tulevat yksin toimivasta CCA-tehdasmallista, joka sijaitsee paikassa A (3518 kg CO₂) ja pienimmät päästöt tulevat integroidusta tehtaasta, joka sijaitsee paikalla B (1926 kg CO₂). Yksin toimivan tehtaan GWP-jakauma on esitetty kuvassa 44 ja integroidun tehtaan paikassa B kuvassa 45. CCA 3-tehdasmallien alkuperäiset SULCA 5.0 GWP-diagrammit ovat esitettyinä liitteissä. Paikkaan A sijoitettujen CCA 3 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 17, kuvassa 1 ja integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 18, kuvassa 1. Paikkaan B sijoitettujen CCA 3 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 19, kuvassa 1 ja integroidun CCA 3-tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi on esitetty liitteessä 20, kuvassa 1.

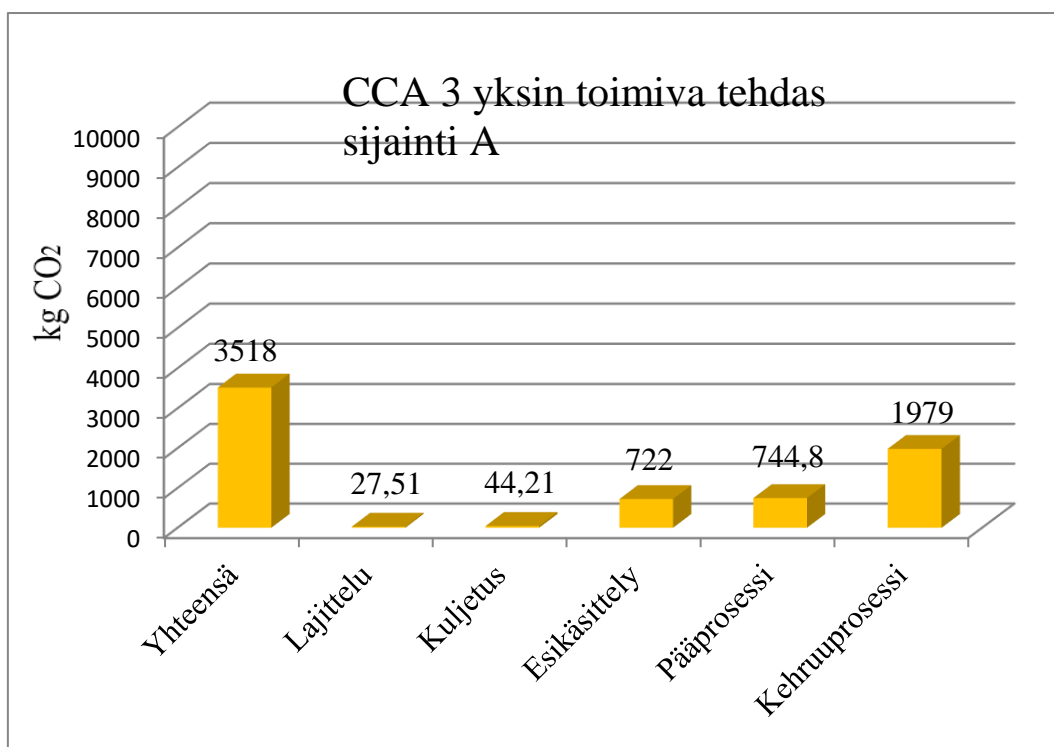
SULCA 5.0 CCA 3 integroitu tehdas LCI



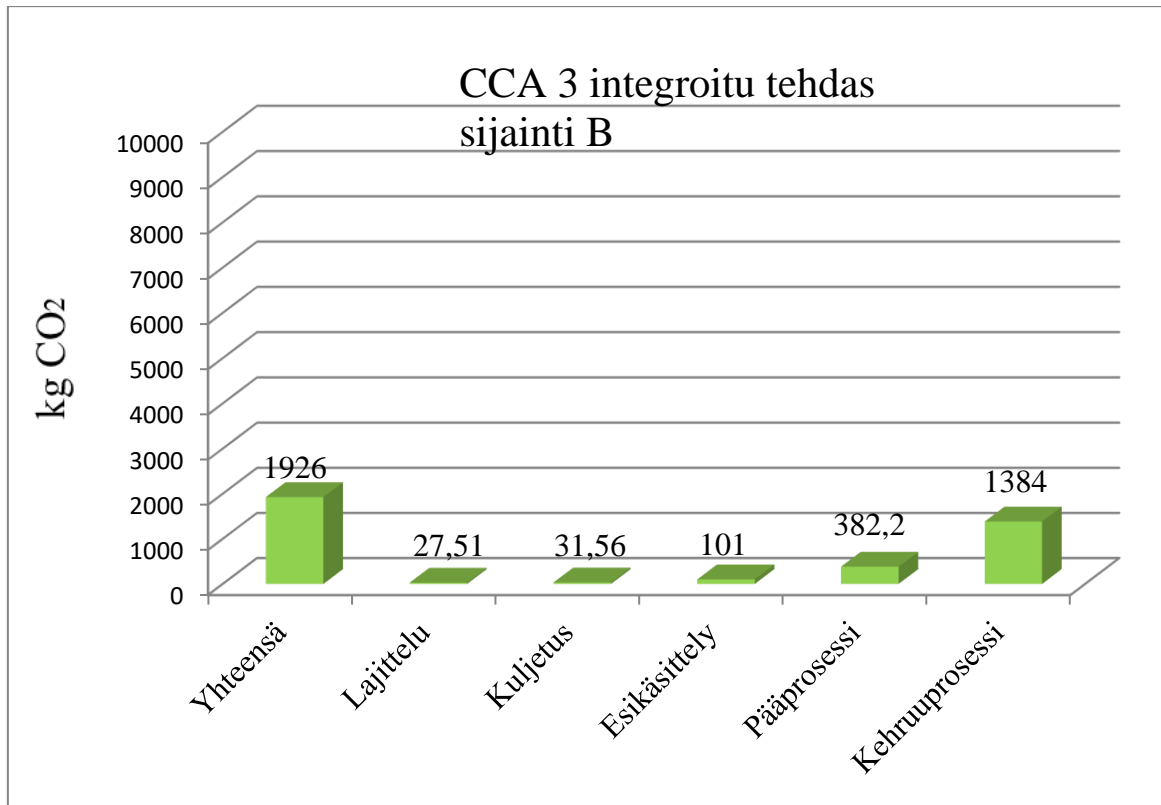
Kuva 42. CCA 3 integroitu tehdas LCI.



Kuva 43. CCA 3-tehtaiden päästöt.



Kuva 44. Yksin toimivan tehtaan GWP-arvot paikassa A.

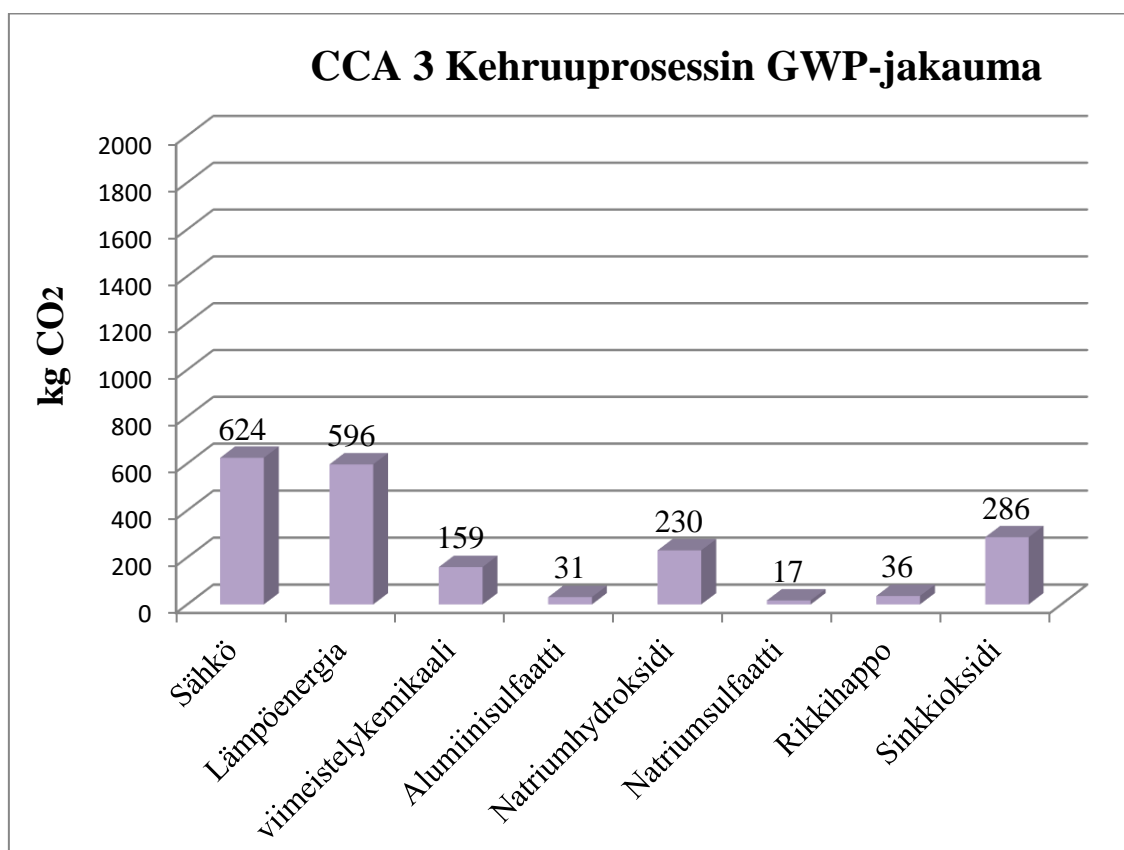


Kuva 45. Integroidun tehtaan GWP-arvot paikassa B.

Kaikkien CCA:n 3-tehdasmallien vaiheittaiset CO₂-päästöt on esitetty taulukossa 51. Lajittelun, sijaintien, esikäsittelyn ja pääprosessin päästöt ovat samat, kuin CCA:lla 2, mutta kehuun CO₂-päästöt ovat pienentyneet. CCA:a 1 ja CCA:a 2 pienemmät CO₂-arvot johtuvat kemikaalien kulutuksen vähenemisestä elektrodialyysin ansiosta. Kemikaaleja NaOH ja H₂SO₄ tarvitsee lisätä kehuuprosessiin 80 % vähemmän, kuin CCA:n 1 ja CCA:n 2 kehuuprosesseissa. Vastaavasti elektrodialyysi tarvitsee enemmän sähköä ja sähkön kulutus nousee arvosta 0,5268 MWh arvoon 3,627 MWh eli noin 600 %. Suurimmat päästöt koituvat yhä kehuuprosessista, koska lisääntynyt sähkön tarve sijoittuu kyseiseen prosessiin. Kehruuprosessin GWP-jakauma on esitetty kuvassa 46 ja jakauman tarkemmat tiedot on koottu taulukkoon 52.

Taulukko 51. CCA 3 GWP-arvot

kg CO ₂ / t CCA-kuitua	CCA 3 yksin toimiva tehdas A kg CO ₂	CCA 3 integroitu tehdas A kg CO ₂	CCA 3 yksin toimiva tehdas B kg CO ₂	CCA 3 integroitu tehdas B kg CO ₂
Lajittelu	27,51	27,51	27,51	27,51
Kuljetus	44,21	44,21	31,56	31,56
Esikäsitely	722,0	101,0	722,0	101,0
Pääprosessi	744,8	382,2	744,8	382,2
Kehruuprosessi	1979	1384	1979	1384
Yhteensä	3518	1939	3505	1926



Kuva 46. CCA 3 GWP-jakauma

Taulukko 52. Kehruuprosessin aineet ja määrät

Aine	Määrä	kg CO ₂	Osuus kehruu- prosessista 1979 kg CO ₂	Osuus koko prosessista 3518 kg CO ₂
Sähkö (MWh)	3,627	624	31	17,7
Lämpöenergia (MJ)	7,89	596	30	16,9
Viimeistelykemikaali (kg)	48,28	159	8	4,5
Alumiinisulfaatti (Al ₂ SO ₄) (kg)	50	31	2	0,9
Natriumhydroksidi (NaOH) (kg)	223	230	12	6,5
Natriumsulfaatti (Na ₂ SO ₄) (kg)	31	17	1	0,5
Rikkihappo (H ₂ SO ₄) (kg)	273	36	2	1,0
Sinkkioksidi (ZnO) (kg)	171	286	14	8,1
Yhteensä		1979	100	56,1

8.6 Kierrätetyn puuvillan allokoiminen

Tässä tutkimuksessa allokaatio on tehty cut-off-metodilla. Allokaatiossa olisi voitu käyttää myös vältetyn skenaarion kaavaa, mutta silloin CCA-kuidulle olisi kohdistettu huomattavan suuri lisä puuvillan elinkaaritaakasta ilman hyvitystä ^[78]. Jos puuvillaa ei kierrätettäisi, se päätyisi jätteenpolttolaitokselle poltettavaksi, koska puuvillaa ei voi viedä enää kaatopaikalle. Kaavan 20 ensimmäisessä osassa on esitetty puuvillakuidun tuottamisesta ja kierrätyksen alkupään tuotannosta (lajittelu ja kuljetus) koituvat GWP-arvot. Kaavan viimeiseen osaan lisätään tiedot puuvillan poltosta syntyneistä GWP-arvoista, jotka hyvitetään alkupään tuotannosta syntyneistä GWP-arvoista.

$$\left(\left(1 - \frac{R_1}{2} \right) * (E_v) + \left(\frac{R_1}{2} * E_{\text{recycled}} \right) \right) - \left(\frac{R_1}{2} * E_D^* \right) \quad (\text{kaava 20})$$

R_1 kuvaa kierrätettävää materiaalin osuutta valmistettavassa tuotteessa. CCA-kuidun tapauksessa luku on 100 %, joten R_1 arvo on 1. E_v kertoo puuvillan viljelyn GWP:n, joka on laskettu Ecoinvent 3.3 LCI-tiedosta Cotton production, jossa 1000 kg puuvillan tuottamisesta koituva GWP-arvo on 2600 kg CO₂ ekv. E_{recycled} on poistopuuvillan lajittelusta ja kuljetuksesta aiheutuvat GWP-arvot, jotka ovat 71,7 kg paikalle A ja 59,1 kg paikalle B. E_D^* kuvaa fossiilisia CO₂-päästöjä, jotka aiheutuvat puuvillan polttamisesta jätteenpolttolaitoksella.

Lähteen ^[78] mukaan puuvillan poltosta syntyneet fossiiliset CO₂-päästöt ovat minimaaliset, sillä puuvilla on biogeeninen materiaali. Puuvillan polttamisesta aiheutuva GWP-arvo oli määritelty lähteessä ^[78] 45,6 g/kg kohti. Hyvityksen osuus olisi tällä oletuksella 45,6 kg / t puuvillakuitua. Soveltamalla kaavaa 20 allokoitiin esimerkiksi CCA 1 yksin toimivan tehtaan paikassa A, saadaan kaavalla 21 allokoitavaksi luvuksi 1313 kg CO₂, joka liitettäisiin kaikkiin tuloksiin paikassa A. Allokoitu luku on suuri polttamisesta saatujen hyvitysten jäädessä pieneksi, joten tulokset esitetään cut-off-metodilla. Lähteessä ^[78] on myös arvioitu, että vuonna 2020 puuvillajätettä ei viedä enää edes polttolaitoksiin. CCA-kuitujen lopulliset GWP tulokset cut-off-metodilla on esitetty taulukossa 53.

$$\left(\left(1 - \frac{1}{2} \right) * (2600) + \left(\frac{1}{2} * 71,7 \right) \right) - \left(\frac{1}{2} * 45,6 \right) = 1313,05 \quad (\text{kaava 21})$$

Taulukko 53. CCA-kuitujen GWP tulokset

CCA yksin toimiva tehdas	GWP-arvo Cut-off-metodilla	CCA integroitu tehdas	GWP-arvo Cut-off-metodilla
CCA 1 yksin toimiva tehdas paikassa A	6033	CCA 1 integroitu tehdas paikassa A	4453
CCA 1 yksin toimiva tehdas paikassa B	6020	CCA 1 integroitu tehdas paikassa B	4440
CCA 2 yksin toimiva tehdas paikassa A	4053	CCA 2 integroitu tehdas paikassa A	2474
CCA 2 yksin toimiva tehdas paikassa B	4041	CCA 2 integroitu tehdas paikassa B	2461
CCA 3 yksin toimiva tehdas paikassa A	3518	CCA 3 integroitu tehdas paikassa A	1939
CCA 3 yksin toimiva tehdas paikassa B	3505	CCA 3 integroitu tehdas paikassa B	1926

9 Vertailu

Tutkimuksessa ^[68] puuvillakuidun elinkaaritutkimus on rajattu raaka-aineen viljelystä valmiiksi tekstiilikuiduksi ja GWP-arvoksi on määritetty 3,040 kg CO₂ ekv. / 1 kg puuvillakuitua. Tästä saadaan 3040 kg CO₂ ekv. / 1000 kg valmista tekstiilikuitua. Taustatieto kyseisessä tutkimuksessa oli hankittu osittain kirjallisuudesta ja osittain laitteiden sekä tekstiilien valmistajilta. Puuvillakuitua on sinänsä vaikea verrata regeneroituun kuituun, koska puuvillakuitua ei valmisteta, se kasvatetaan ja puhdistetaan ennen langanvalmistusprosessia. Vedenkulutus 1000 kg puuvillakuitua kohti on 2000 m³. ^[68]

Yksi tutkimuksen ^[10] viskoosikuitu oli valmistettu Aasiassa yksin toimivassa viskoositehtaassa, joka käyttää pääasiassa fossiilisia polttoaineita energialähteenä. Viskoosin raaka-aineena toimiva sellu kuljetetaan tehtaalte rahtialuksella, joka kulkee fossiilisilla polttoaineilla. Yksin toimivan tehtaan GWP-arvoksi laskettiin 5800 kg CO₂ ekv. / t viskoosikuitua. Vedenkulutus 1000 kg:lle Aasian viskoosikuitua kohti on 319 m³.

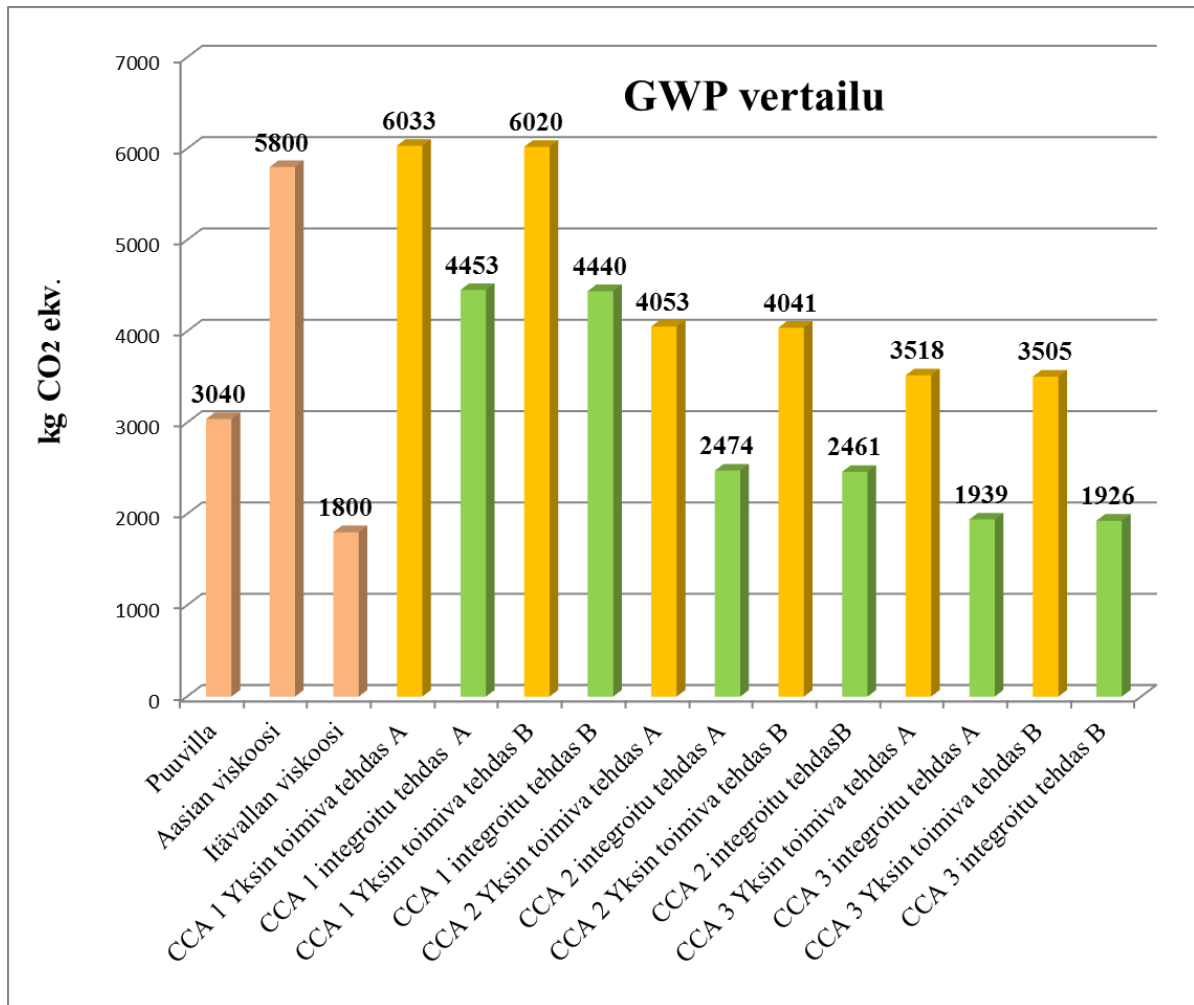
Toinen tutkimuksen ^[10] Itävallan viskoosikuitu oli valmistettu Lenzingin integroidussa selluviskoositehtaassa. Viskoosikuidun GWP-arvoksi laskettiin kyseisessä tutkimuksessa noin 1800 kg CO₂ ekv. / t viskoosikuitua. Integroitu tehdas pohjautuu parhaaseen mahdolliseen teknologiaan (BAT) ja tehokkaaseen rikkihiilenkiertoon. BAT-teknologialla valmistetun sellun osuus on 415 kg CO₂ ekv. ^[79]. Viskoosin tapauksessa GWP ei ole indikaattorina välttämättä hyvä ilmaisemaan viskoosiprosessin ympäristövaikutuksia, koska viskoosiprosessissa käytettävän myrkyllisen rikkihiilen ympäristövaikutus ei näy GWP-arvossa. Vedenkulutus 1000 kg:lle Itävallan viskoosikuitua kohti on 445 m³. ^[80]

CCA 1-prosessi paikassa A tuottaisi 1000 kg CCA-kuitua kohti 6033 kg CO₂ ekv. ilman integraatiota ja 4453 kg CO₂ ekv. integroituna. Päästöjen ero johtuu yksin toimivan tehtaan käyttämästä kaupallisesta lämpöenergiasta. Paikassa B integroimaton CCA 1-tehdas tuottaa 6020 kg CO₂ ekv. / t CCA 1-kuitua eli 13 kg vähemmän CO₂:a, kuin paikassa A. Integroitu tehdas paikassa B aiheuttaa 4440 kg CO₂ ekv. Näistä tiedoista voidaan tehdä yhteenveto, että integroitu tehdas sijainnilla B tuottaa kaikista pienimmät CO₂-päästöt kaikilla CCA-

tehdasmalleilla, koska muuttujat ovat samat. Sijaintien A ja B välillä ei ole huomattavan suurta eroa. Paikan B kuljetuslaskuissa oli otettu huomioon junamatkasta aiheutunut sähkön kulutus, mutta ei kuljetuksia junalle tai junalta tehtaalle. CCA:n 1 CO₂-päästöt johtuvat pääasiassa kemikaalien suuresta kulutuksesta esimerkiksi NaOH:a tarvitaan 1494 kg / t CCA 1 valmistamiseen. Vedenkulutus 1000 kg:lle CCA 1-kuitua kohti on yhteensä 86 m³.

CCA 2-prosessin eri tehdasmallien arvot ovat noin 1980 kg CO₂ ekv. pienemmät, kuin CCA 1-mallien. Tämä johtuu kemikaalien kulutuksen vähentämisestä tehostamalla kemikaalien kierrätystä CCA-valmistusprosessissa. Integroiminen on paras vaihtoehto myös tälle tehdastyypille, koska integroiduilla versioilla CO₂-arvot sijoittuvat referenssien viskoosi ja puuvilla väliin. Pienimmän arvon 2461 kg CO₂ ekv. saa integroitu tehdas sijainnilla B. Vaikka prosessikemikaaleja on vähennetty CCA 1-prosessiin verrattuna niin NaOH:a tarvitaan edelleen 961 kg / t CCA:n 2 valmistamiseen. Vedenkulutus 1000 kg CCA 2-kuitua kohti on yhteensä 31 m³.

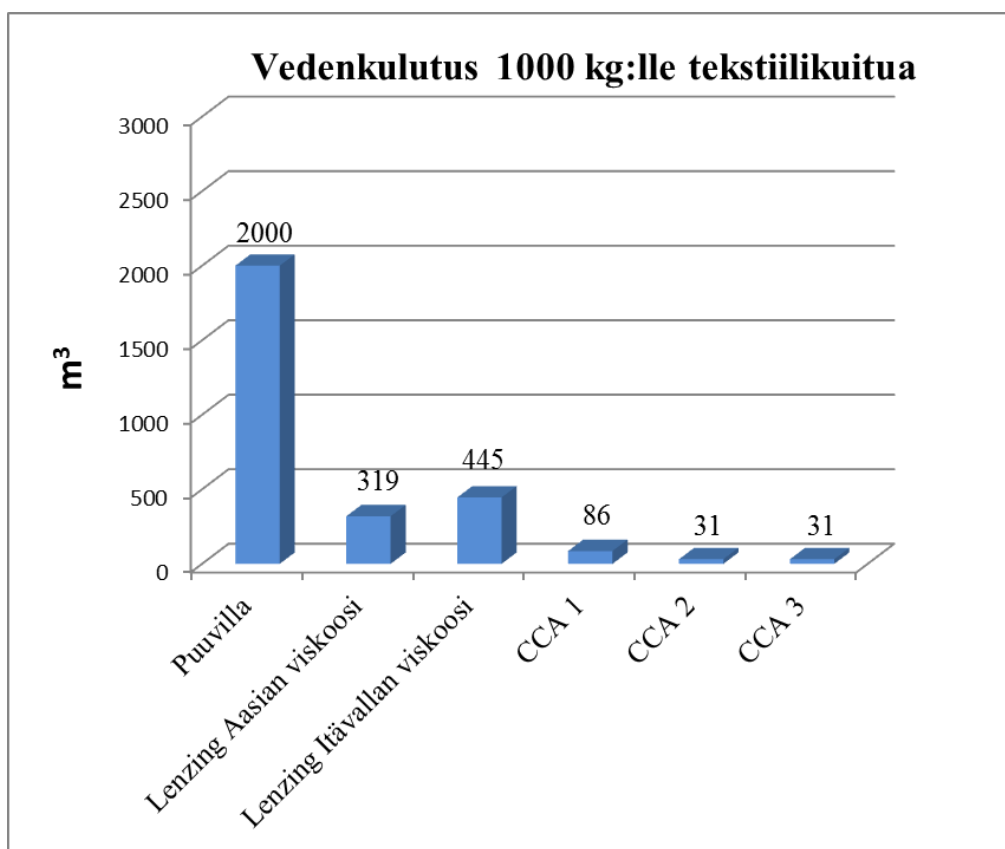
CCA 3-prosessin tehdasmallit saavat 535 kg pienemmät CO₂-arvot, kuin vastaavat CCA:n 2 mallit, mikä tarkoittaa, että verrattuna kahteen edelliseen CCA-prosessiin, CCA 3-prosessi on ympäristöystävällisin vaihtoehto CO₂-päästöjen osalta. CCA 3-prosessissa kemikaalien kulutusta on vähennetty elektrodialyysin avulla. Elektrodialyysi kuluttaa enemmän sähköä, mutta mahdollistaa keuruuliuksessa muodostuneen Na₂SO₄:n palautuksen NaOH:ksi ja H₂SO₄:ksi, jotka siirtyvät takaisin prosessin kiertoon. CCA 3-prosessilla NaOH:a tarvitaan tällä menetelmällä 223 kg / t CCA 3-kuitua. Pienimmän GWP-arvon kaikista CCA-tehdasmalleista sai integroitu CCA 3 tehdas, joka sijaitsee paikassa B. Puuvillan, viskoosin ja CCA-mallien GWP-arvot ovat esitettyinä kuvassa 47. Vedenkulutus 1000 kg CCA 3-kuitua kohti on sama kuin CCA 2-kuidulla eli 31 m³.



Kuva 47. GWP-arvot / 1000 kg tekstiilikuitua.

Puuvillan vedenkulutus on huomattavasti suurempi regeneroituihin kuituihin verrattuna. Ero CCA:an 2 ja CCA:n 3 nähden on yli 98 %. Puuvillan viljely kuluttaa paljon vettä ja puuvillaa kasvatetaan monissa maissa, joissa puhdasta vettä on vähemmän saatavilla, kuin esimerkiksi pohjoismaissa. Tämä on aiheuttanut muun muassa Aral-järven kuivumisen Aasiassa, koska puuvillaviljelmät vaativat paljon vettä kasteluun. Lenzingin Aasian ja Itävallan viskoosin vedenkulutuksesta suurin osa koostuu jäähdytysvedestä, jota tarvitaan Aasian viskoosilla 308 m³ ja Itävallan viskoosilla 403 m³ / t viskoosikuitua. Lähteessä ^[10] on kerrottu, että tekstiilikuitujen prosessointien jäähdytysvesi ei välttämättä kuluta puhtaan veden varantoja, mutta esimerkiksi puuvillan viljely kuluttaa. CCA:n 1 valmistusprosessin vedenkulutus koostuu puolestaan suurilta osin prosessivedestä, jota tarvitaan 50 m³ ja pesuvettä tarvitaan 25 m³ / t CCA 1-kuitua. CCA:n 1 vedenkulutus on yhteensä 73 % pienempi, kuin Lenzingin Aasian viskoosilla ja 80 % pienempi kuin Lenzingin Itävallan viskoosilla. Vertailun pienimmät arvot vedenkulutuksessa ovat CCA:lla 2 ja CCA:lla 3. Näissä prosesseissa kuluu

eniten vettä jäähdytyksessä, johon tarvitaan vettä $11 \text{ m}^3 / \text{t}$ CCA-kuitua kohti ja prosesseihin lisättävä vesimäärä on ainoastaan 4 m^3 . Ero Aasian viskoosiin on 90 % ja Itävallan viskoosiin 93 %. Vedenkulutuksen diagrammi 1000 kg:lle tekstiilikuitua on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Vedenkulutus 1000 kg:lle tekstiilikuitua.

10 Yhteenveto

Tekstiiliteollisuudella on tarve luoda uusia suuntauksia nopealla syklillä ja tämä lisää poistotekstiilin määrää. Samaan aikaan tarvitaan lisää uusia materiaaleja tekstiilien valmistamiseen ja käyttämällä poistotekstiilejä vaateteollisuuteen saataisiin suljettu kiertotalous. Kestävän kehityksen kannalta poistomateriaalien käyttö uuden tekstiilin valmistuksessa on viisasta, koska neitseellisten materiaalien tuottamiseen liittyy monia ympäristöä rasittavia tekijöitä, kuten puuvillan tapauksessa viljelystä aiheutuva vedenkulutus ja ympäristön saastuminen tuholaistorjunta-aineilla. Viljelyn jälkeen puuvilla puhdistetaan ja valkaistaan,

kehrätään langaksi sekä värjätään. Suuriosa puuvillanviljelystä ja langanvalmistuksesta tapahtuu maissa, joissa ympäristöä koskevat lait eivät ole yhtä tiukkoja kuin esimerkiksi Suomessa. Tämän takia ympäristöön kulkeutuu eri tavoin ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Elinkaariarvioinnin (LCA:n) avulla voi tarkastella tutkitun tuotteen valmistuksesta koituvia seurauksia ympäristölle. LCA koostuu elinkaari-inventaarista (LCI) ja ympäristövaikutusarvioinnista (LCIA). LCI:ssa tutkimuksen rajojen sisäpuolelle jääville toiminnoille määritellään energian, veden ja kemikaalien kulutus. LCI:n pohjalta lasketaan LCIA, jossa inventaariin osallistuviin aineisiin liitetään vastaavat LCI-tiedot (esimerkiksi Ecoinvent 3.3:sta). LCI-tiedot sisältävät aineen valmistukseen sekä päästöihin liittyvät kemikaalit 1 kg käytettyä ainetta kohti. LCI-tietojen kemikaalit kertaantuvat sen mukaan miten inventaarissa on käytetty kyseistä ainetta ja tulokset ilmaistaan eri ympäristöindikaattoreiden kautta. Ilmaston lämpenemisen potentiaali (GWP) on yksi ympäristöindikaattoreista, jota käytettiin tässä tutkielmassa ympäristövaikutusten tulkinnassa. Kierrätystuotteiden ympäristöjalanjälkeen tulisi lisätä allokoitu luku, mikä tarkoittaa osaa alkuperäisen tuotteen valmistuksen ympäristörasituksesta. Tapoja kierrätystuotteen allokointiin on monia ja tutkitun tuotteen elinkaaren avoimuus on yksi tekijä, mikä määrittää sopivan allokointi-metodin. Tekstiiliteollisuudelle kehitetään uutta mallia (PEFCR), joka sisältää kaikki vaiheet raaka-aineen tuottamisesta viimeiseen sijoituspaikkaan. Tällä mallilla arvioidaan yksittäisen vaatekappaleen elinkaarta, kuten puuvilla T-paidan. Malli on vielä kehitysvaiheessa, mutta puuvilla T-paidalle löytyy tutkimuksia kirjallisuudesta.

Tekstiiliteollisuuden prosessit filamentointi, tärkkäys, liuottaminen, puhdistaminen, kutistaminen, merserointi, valkaisu, värjäys, pesu ja neutralointi ovat suurimpia puhtaan veden kuluttajia. Kyseisistä prosesseista kulkeutuu haitallisia kemikaaleja ympäristöön jäteveden mukana sellaisissa maissa, joissa ympäristöarvot ovat toissijaisia. Jäteveden sisältämien kemikaalien vaikutusta ympäristöön tutkitaan vesijalanjäljen avulla, jossa määritetään ympäristövaikutukset LCA:n tavoin eri indikaattoreiden kautta ilmaistuna. Vesijalanjälkeen vaikuttaa paikalliset olosuhteet, kuten saatavilla olevan puhtaan veden määrä sekä laatu. Tekstiiliteollisuuden kestävä kehitys edistämiseksi puuvillan tapauksessa on suunniteltu eettisempiä viljelytapoja tehotuotetun puuvillan rinnalle. Osa näistä eettisemmistä viljelytavoista on sertifioitu, kuten luomupuuvilla ja BC-puuvilla. Lisäksi kierrätetystä puuvillasta on usein maininta vaateen etiketissä. Luomupuuvilla sertifikaatin saa, jos noudattaa mahdollisimman luonnonmukaisia viljelymetodeja. Metodit on määritelty GOTS-järjestön säännöissä. BC-puuvilla sertifikaatin saa, jos puuvillan viljelyssä ei käytetä

Tukholman sopimuksessa kiellettyjä kemikaaleja. BC-tuotantoa valvoo järjestö nimeltä Better cotton initiative. Järjestön edustajat tekevät sattumanvaraisia tarkastuksia puuvillatiloille ja kieltävät sertifikaatin käytön, mikäli kiellettyjä kemikaaleja havaitaan. Mekaanisesti kierrätettyä puuvillaa on ollut saatavilla markkinoilla kauan ja viime vuosina on tutkittu tapoja puuvillatekstiilien kemialliseen kierrättämiseen.

Puuvillakuitu sisältää noin 94 % selluloosaa, jota käytetään regeneroitujen tekstiilikuitujen raaka-aineena. Regeneroitujen kuitujen raaka-aineena on tavallisesti käytetty puu- ja kasvi-peräistä liukoselluloosaa, jonka täytyy sisältää vähintään 92 % puhdasta selluloosaa. Poistopuuvilla on puhdistettava mahdollisimman hyvin kaikista pintakäsittely- ja väriaineista ennen kuin sitä voi käyttää regeneroitujen kuitujen raaka-aineena. Prosesseja regeneroidun tekstiilikuidun valmistamiseen ovat viskoosi-, Biocelsol-, selluloosakarbamaatti-, Lyocell- ja Ioncell-prosessit. Tässä tutkimuksessa perehdyttiin poistopuuvillan kemialliseen kierrättämiseen selluloosakarbamaatti-prosessilla. Kyseisellä prosessilla valmistettua kuitua kutsutaan CCA-kuiduksi. Laskettujen CCA-prosessien CO₂-arvoja (GWP-arvoja) verrattiin referensseinä toimiviin puuvillaan ja viskoosiin. Puuvillakuidun ja regeneroidun kuidun vertaaminen on haastavaa, sillä puuvillakuitua ei valmisteta. Kirjallisuuskatsaukseen valitut referenssi viskoosit edustivat integroitua ja integroimatonta tehdasta. Integroitu viskoosiprosessi on hyvä vertailukohde, sillä CCA-prosessi on suunniteltu myös integroitavaksi sellutehtaaseen. Viskoosia käsittelevässä tutkimuksessa GWP-luku 1000 kg viskoosikuitua kohti oli melko samaa luokkaa, kuin CCA:lla 3.

CCA-kuidun valmistamiseksi ajateltiin kolme eri prosessia, joille laskettiin inventaarin lisäksi GWP-arvot. Jokaiselle prosessille tehtiin 4 eri tehdasmallia, joissa muuttujina olivat integrointi ja tehtaan sijainti. Ensimmäisessä prosessissa (CCA 1) inventaari oli laskettu Aalto-yliopiston harjoitustyön perusteella siten, että kaikki kemikaalit, jotka syötettiin prosessiin, olivat uusia eli kemikaalien ja veden kierrätystä ei otettu huomioon. Tuloksena saatiin korkeat GWP-arvot, jotka olivat yksin toimivien CCA 1-tehtaiden osalta melkein kaksinkertaiset puuvillaan verrattuna. Myös integroitujen CCA 1-tehtaiden GWP-arvot olivat suuremmat, kuin puuvillalla. CCA 2-prosessissa kemikaalien ja veden kierto on suunniteltu mahdollisimman tehokkaaksi. Kemikaalit saa kierrätettyä muuten paitsi saostuessaan suolaksi. Tuloksena kemikaalien kulutus laski ja sen myötä myös GWP-arvot. Tässäkin mallissa vain integroitujen tehtaiden GWP-arvot olivat pienemmät, kuin puuvillalla.

Kolmannessa prosessissa CCA 3 NaOH:n ja H₂SO₄:n kulutusta oli vähennetty elektrodialyysin avulla. Elektrodialyysi palauttaa natriumhydroksidia ja rikkihappoa takaisin kiertoon hajottamalla H₂SO₄:a, joka on muodostunut näistä kemikaaleista kehruhauteessa. Tämä toimenpide nostaa sähkönkulutusta huomattavasti, mutta CCA 3-tehdasmallit saavat silti pienempiä GWP-arvoja CCA:an 1 ja CCA:an 2 verrattuna. Sijainnin A ja B välillä ei ollut suurta eroa GWP-arvoissa. Sijainti B oli 13 kg CO₂ ekv. pienempi, kuin sijainti A, mutta etäisyyslaskut ovat suuntaa antavat. Sijainnille B laskettiin vain junamatkan osuus, mutta ei kuljetuksia lajittelukeskuksista junalle tai junalta tehtaalle. Sijaintien vertailussa taloudellinen kannattavuus voisi olla hyvä indikaattori.

Vedenkulutuksessa oli suuria eroja eri referenssien välillä. Puuvilla kuluttaa kaikista eniten vettä 1000 kg kuitua kohti. Vähiten vettä kuluu prosesseissa CCA 2 ja CCA 3. Kyseiset prosessit on suunniteltu CCA:n 1 pohjalta. CCA 1 kuvastaa tehdasta, johon lisätään kemikaalit ja vesi ensimmäistä kertaa. Tämän jälkeen tehtaassa on joko tehokas kemikaalien kierto (CCA 2) tai kemikaalien kierto ja elektrodialyysi (CCA 3). Alhaisimmat GWP-arvot on prosessilla CCA 3. Tästä voi tehdä johtopäätöksen, että tulevalle CCA-tehtaalle integraatio ja kemikaalimäärien vähentäminen ovat avainasemassa GWP-arvojen pienentämisessä.

Kirjallisuuslähteet

1. Ymparistoministerio; Lempivaatteesta energiajätteeksi. [http://www.ymp.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Julkaisut/Ymparistolehti/2014/Lempivaatteesta_energiajatteeksi\(32131\)](http://www.ymp.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Julkaisut/Ymparistolehti/2014/Lempivaatteesta_energiajatteeksi(32131).). (15.8.2016).
2. Nykänen, T., Selluloosakuidut tulevaisuuden supermateriaalina. <http://www.metsafibre.com/fi/echo/Pages/Maailmanluokan-materiaali.aspx>. (24.8.2016).
3. Woolridge, A., Ward, G., Phillips, P., Collins, M. & Gandy, S. Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material. *Resour. Conserv. Recycl.* 46(2006)94–103.
4. Ympäristöasioiden hallinta; elinkaariarviointi: periaatteet ja pääpiirteet. Life cycle assessment: principles and framework. Sfs-En Iso ; 14040, *Suomen Standardisoimisliitto, 2006*.
5. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.P., Suh, S., Weidema, B.P. & Pennington, D.W. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.* 30(2004)701–720.
6. Nicholson, A., Olivetti, E., Gregory, J., Field, F. & Kirchain, E. End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. *Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009*.
7. Jolliet, O., Müller-Wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, N., Pena, C., Pennington, D., Potting, J., Rebitzer, G., Stewart, M., Haes, H. & Weidema, B. The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. *Int. J. LCA* 9(2004)394–404.
8. Myrkyllisten päästöjen lista U.S.A. <http://scorecard.goodguide.com/chemical-profiles/>. (16.8.2016).
9. McKone, T. & Hertwich, E. The human toxicity potential and a strategy for evaluating model performance in life cycle impact assessment. *Int. J. LCA* 6(2001)106–109.
10. Shen, L. & Patel, K. Life cycle assessment of man made cellulose fibres. Lenzing

- Berichte 88(2010)1–59.
11. Loiseau, E. Environmental impacts evaluations methods of water use. Agro Paris Tech, Paris Institute of Technology for Life, Food and Environmental Sciences, **2010**.
 12. Hoekstra, A.Y. & Hung, P.Q. Virtual water trade. *Value of water research report series No 11*. (2002).
 13. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi; Periaatteet ja pääpiirteet. *SFS, Suomen standardisoimisliitto.SFS-EN ISO 14041*, **1998**.
 14. Lighthart, T. & Ansems, T. *Post-consumer waste recycling and optimal production*, In Tech, **2012**.
 15. Hasanbeigi, A. & Price, L. A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *J. Clean. Prod.*, 95(2015)30–44.
 16. Wang, L., Ding, X. & Wu, X. Blue and grey water footprint of textile industry in China. *Water Sci. Technol.* 68(2013)2485–2491.
 17. Nikula, J. Suomen vesijalanjälki; Globaalikuva suomalaisten vedenkulutuksesta. *WWF SUOMI*, **2012**.
 18. Wessman-Jääskeläinen, H. *Water footprint. Tekstiilien ympäristövaikutukset*. (VTT Technical Research Centre of Finland, 2014).
 19. Standardization, I. O. for. Environmental management - water footprint - Principles, requirements and guidelines. *ISO 14046*, **2014**.
 20. Product Environmental Footprint (PEF) Category Rules (PEFCR) Pilot. *Technical secretariat of the PEFCR pilot T-shirts*, **2016**.
 21. Trade Cotton (CTN). <http://www.tradingeconomics.com/commodity/cotton> (28.6.2016).
 22. Luomupuuvilla. <http://www.organiccotton.org/>. (15.6.2016).
 23. Better Cotton Initiative. <http://www.bettercotton.org> (15.6.2016).
 24. Alén, R. Puun kuoren koostumus ja hyödyntämismahdollisuuksia. Jyväskylän yliopisto, Soveltavan kemian osasto, **2010**.

25. Tölkkö, S., Ukkonen, T. & Yli-Pietilä, T. Puuvillan tuotanto kestävän kehityksen näkökulmasta.
26. Dong, H., Li, W., Tang, W. & Zhang, D. Development of hybrid Bt cotton in China-A successful integration of transgenic technology and conventional techniques. *Curr. Sci.*, 86(2005)778–782.
27. De-oiled Castor Cake.
http://www.castoroil.in/reference/glossary/de_oiled_castor_cake.html- (23.6.2016).
28. Kumar, V. & Navaratnam, V. Neem (*Azadirachta indica*): Prehistory to contemporary medicinal uses to humankind. *Asian Pac. J. Trop. Biomed.*, 3(2013)505–514.
29. Eyhorn, F., Ramakhrisnan, M. & Mäder, P. The viability of cotton-based organic farming systems in India. *Int. J. Agric. Sustain.*, 5(2007)25–38.
30. GOTS Standards. <http://www.global-standard.org/the-standard/general-description.html>. (27.6.2016).
31. Seppälän vaatekeräys. <https://www.seppala.fi/fi/vastuullisuus/vaatekerays> (28.6.2016).
32. H&M conscious. <http://www.hm.com/fi/garment-collecting> (28.6.2016).
33. KappAhl vaatekeräys. <http://www.kappahl.com/fi-FI/kappahlista/kestava-kehitys/tuotevastuu/tekstiilikerays/> (25.11.2016).
34. Kobori, M. Embracing the circular economy. <http://www.levistrauss.com/unzipped-blog/2015/07/embracing-the-circular-economy/> (29.6.2016).
35. Mishra, S.P. *A Text Book of Fibre Science and Technology*. New Age International publishers. 2005.
36. Patil, P.G. & Arude, V.G. Recent advantages in Cotton Ginning Technology in India. *Central Institute for Research on Cotton Technology, Mumbai, 2014*.
37. Harper, M. *Inclusive Value Chains: A Pathway out of Poverty. Series on Economic Development and Growth*, 4. painos, World Scientific Publishing Ltd., 2010.
38. Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques for the textiles industry. *The European Commission, 2003*.
39. Dahlbo, H., Aalto, K., Salmenperä, H., Eskelinen, H., Pennanen, J., Sippola, K. &

- Huopalainen, M. Tekstiilien uudelleenkäytön ja tekstiilijätteen kierrätyksen tehostaminen Suomessa. *Ympäristöministeriö*, **2015**.
40. Heikkilä, P. Henkilökohtainen tiedonanto. 2016.
41. Muthu, S. *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain*. Woodhead Publishing Series in Textiles, **2014**.
42. Roznev, A., Puzakova, E., Akpedeye, F., Sillstén, I., Dele, O. & Ilori, O. Recycling in textiles. *HAMK University of Applied Sciences*, **2011**.
43. Lehtiniemi, P. Luonnonkuitupohjaiset lujitteet kelaamalla valmistetuissa komposiiteissa. Opinnäytetyö, *Tampereen teknillinen yliopisto*, **2011**.
44. Pokhrel, C. Determination of strength properties of pine and its comparison with birch and eucalyptus. Kandidaatin tutkinto, *Saimaa University of Applied Sciences*, **2010**.
45. Sugesty, S., Kardiansyah, T. & Hardiani, H. Bamboo as Raw Materials for Dissolving Pulp with Environmental Friendly Technology for Rayon Fiber. *Procedia Chem.* 17(**2015**)194–199.
46. Puuvillakuidun ominaisuuksia.
<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030507/1086702266491/1146637794621/1146638150975/1146638772293.html> (1.10.2016).
47. Virtanen, S. Lignoselluloosan hydrolyysi. *Lappeenrannan teknillinen yliopisto*, **2006**.
48. Chen, Y., Wan, J., Zhang, X., Ma, Y. & Wang, Y. Effect of beating on recycled properties of unbleached eucalyptus cellulose fiber. *Carbohydr. Polym.*, 87(**2012**)730-736.
49. Sixta, H. Ioncell-F, a novel Man-made Cellulosic Fiber. *School of Chemical Technology*, Department of Forest Products Technology. **2014**.
50. Harlin, A. Henkilökohtainen tiedonanto. 2016.
51. Fibre and Filament Production. <http://www.tikp.co.uk/knowledge/technology/fibre-and-filament-production/dry-jet-wet-spinning/> (23.8.2016).
52. Fu, F., Zhou, J., Zhou, X., Zhang, L., Li, D., Kondo, T. Method of cellulose multifilament from cellulose carbamate on a pilot scale. *ACS Sustain. Chem. Eng.*

- 2(2014)63–2370.
53. Vehvilainen, M. Wet-spinning of cellulosic fibres from water-based solution prepared from enzyme- treated pulp. *Tampere University of Technology*, **2015**.
 54. Fu, F., Xu, M., Wang, H., Ge, H. & Zhou, J. improved synthesis of cellulose carbamates with minimum urea based on an easy scale-up method. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 3(2015)1510–1517.
 55. Youhanan, L. Environmental Assessment of Textile Material Recovery Techniques; Examining Textile Flows in Sweden. Royal Institute of Technology, **2013**.
 56. SaXcell a revolutionary fibre.
<https://saxion.nl/site/index/saxcell/revolutionaryvirginfiber/> (26.8.2016).
 57. Evrnu. <http://www.evrnu.com/technology/> (4.7.2016).
 58. *Design driven value chains in the world of cellulose DWoC*. (2013).
 59. Tekstiilien suljettu kiertotalous (TEKI) – Mitä? THE RELOOPING FASHION 2. (2015).
 60. Mistra Future Fashion. <http://mistrafuturefashion.com/sustainable-fashion/> (14.11.2016).
 61. Lenzing press releases. <http://www.lenzing-fibers.com/en/press-releases/press-releases-details/tencelR-enabling-circular-economy-in-the-textile-world-next-generation-ecological-fiber/> (14.11.2016).
 62. NMMO.
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/224286?lang=fi®ion=FI> (12.6.2016).
 63. Zhu, Y. The Development of Membranes Made with Blends of Soy Protein and Other Natural Biopolymers using a Novel Solvent System and Stabilized with Glutaraldehyde. *The Graduate Faculty of North Carolina State University*, **2011**.
 64. Michud, A., Tanttu, M., Asaadi, S., Ma, Y., Netti, E., Kääriäinen, P., Persson, A., Berntsson, A., Hummel, M & Sixta, H. Ioncell-F: ionic liquid-based cellulosic textile fibers as an alternative to viscose and Lyocell. *Text. Res. J.* 00(2015)1–10.

65. Parviainen, H., Parviainen, A., Virtanen, T., Kilpeläinen, I., Ahvenainen, P., Serimaa, R., Grönqvist, S., Maloney, T. & Maunu, S. Dissolution enthalpies of cellulose in ionic liquids. *Carbohydr. Polym.*, 113(2014)67–76.
66. From Birch to Catwalk. <https://www.youtube.com/watch?v=4aQ3EkNUhsc> (15.7.2016).
67. Sixta, H., Michud, A., Hauru, L., Asaadi, S., May, Y., King, A., Kilpeläinen, I. & Hummel, M. Systems and interactions Ioncell-F: A high-strength regenerated cellulose fibre. *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 30(2015)43-57.
68. Van Der Velden, N. M., Patel, M. K. & Vogtländer, J. G. LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19(2014)331–356.
69. Zhang Liu, X., Xiao, R. ja Yuan, Z., Y. Life cycle assessment of cotton T-shirts in China. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20(2015)994–1004.
70. Valta, K. & Sivonen, E. Method for manufacturing cellulose carbamate. US 7 662 953, **2010**.
71. Guo, Y., Zhou, J., Song, Y. & Zhang, L. An efficient and environmentally friendly method for the synthesis of cellulose carbamate by microwave heating. *Macromol. Rapid Commun.* 30(2009)1504–1508.
72. Henttonen, A., Hassinen, R., Perttula, I. & Harlin, H. *CCA process, VTT. Report II*. Aalto University, School of Chemical Technology, **2016**.
73. Harrisson, E. Benefits of energy integration in a freezing process. *Turku University of Applied Sciences*, **2016**.
74. Markowski, H. Contribution to Eco innovation. *Eco-innovation*, **2012**.
75. European energy market reform Country profile: Netherlands. *Deloitte*, **2015**.
76. Textile granulator. <http://www.cmg-america.com/textile-granulator> (1.11.2016).
77. Etäisyys. <http://www.vaelimatka.org/> (27.10.2016).
78. Schmidt, A., Watson, D., Roos, S., Askham, C. & Brunn Poulsen, P. Gaining benefits from discarded textiles – LCA of different treatment pathways, *Norden*, **2016**.

79. Gonzalez-Carcia, S., Hospido, A., Agnemo, R., Svensson, P., Selling, E., Moreira, T & Feijoo, G. Environmental life cycle assessment of a Swedish dissolving pulp mill integrated biorefinery. *Journal of industrial ecology*, 15(2011)568-583
80. Catharina Hohenthal. Henkilökohtainen tiedonanto. **2016**.

Taulukko 1. CCA 1 esikäsittelyn agglomeraatin tiedot

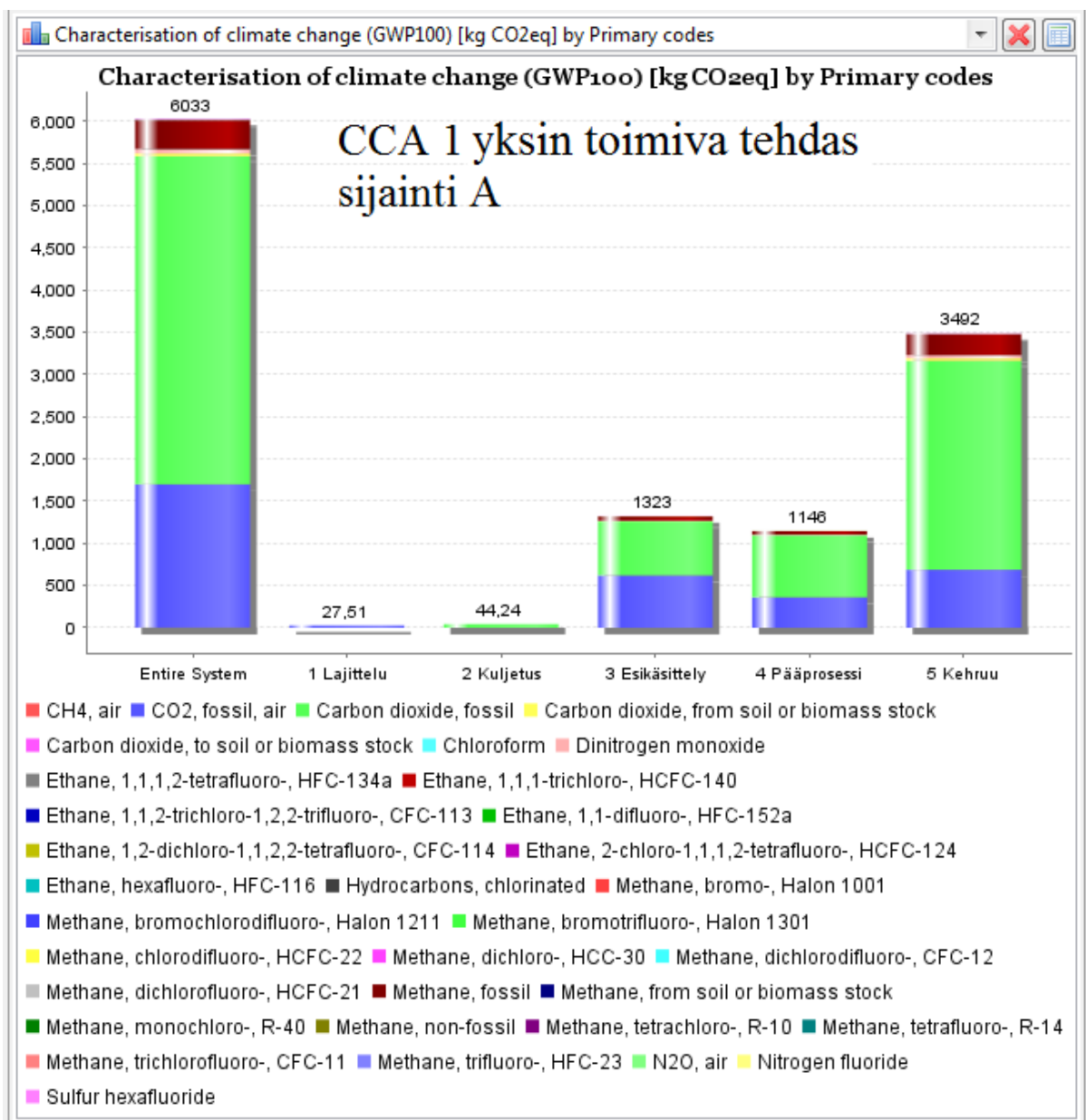
1000 kg CCA 1	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
Poistopuuvilla	1254	1122	132	-
NaOH	290	253	37	Market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
H ₂ O ₂	41	41	0	Market for hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
H ₂ SO ₄	1156	1110	46	Market for sulfuric acid
O ₃	15	15	0	Market for ozone, liquid, RER
Metallit	0	35	-35	-
Silikaatit	0	62	-62	-
1000 kg CCA 1 energia	Input	Output	Tase	
Energia, (GJ)	8,221	0	8,220	Heat Fin
1000 kg CCA 1 vesi	Input	Output	Tase	
Vesi sisään/ulos	24770	24420	350	-
Vesi pesu	10440	10440	0	-

Taulukko 1. CCA 1 pääprosessin agglomeraatin tiedot

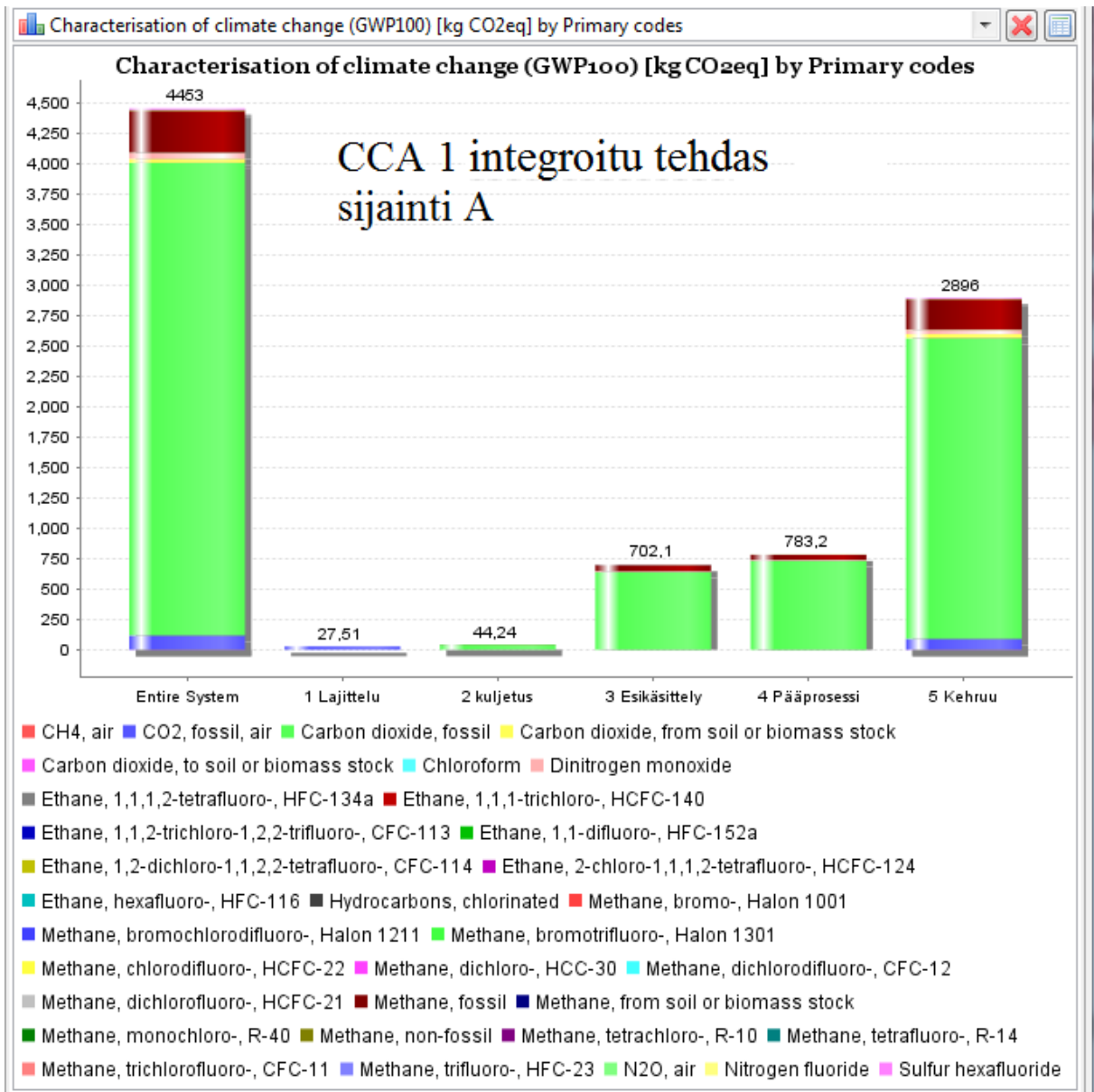
1000 kg CCA 1	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
Poistopuuvilla (sisään) CCA (ulos)	1122	1207	15	-
H ₂ O ₂	26	4	22	Market for hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
Urea	225	105	100	Market for urea, as N, GLO
O ₂		4	-4	-
1000 kg CCA 1 energia	Input	Output	Tase	
Energia, (GJ)	4,8		4,8	Heat Fin
1000 kg CCA 1 vesi	Input	Output	Tase	
Vesi sisään/ulos	616	834	-218	-
Vesi prosessi	235	17	218	-
Vesi jäädytys	765	765	0	-

Taulukko 1. CCA 1 kehruprosessin agglomeraatin tiedot

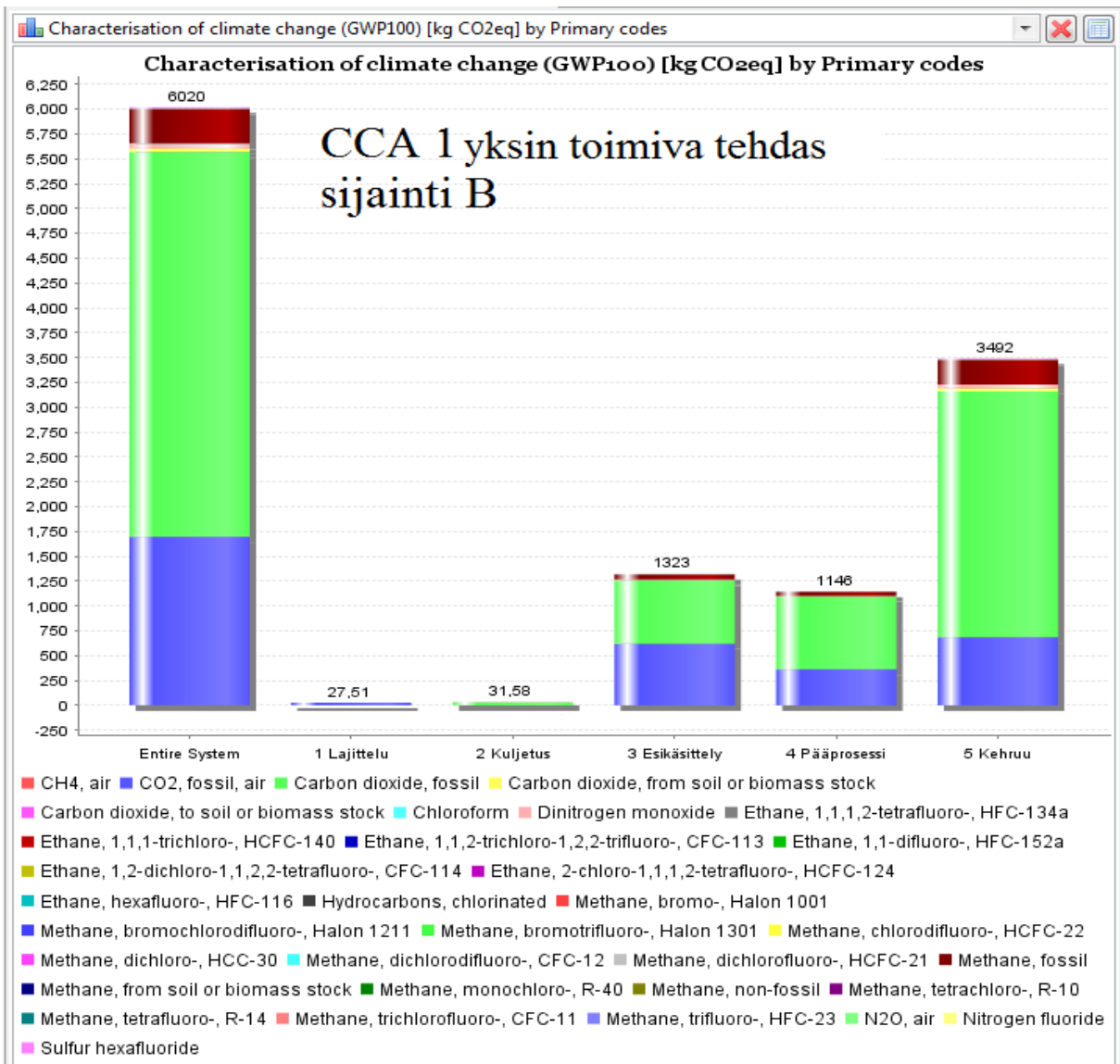
1000 kg CCA 1	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
CCA	1207	1000	7	-
NaOH	1203	280	923	Market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
Urea	105	105		Market for urea, as N, GLO
ZnO	171	0	171	Market for zincoxide, GLO
H ₂ SO ₄	1135	0	1135	Market for sulfuric acid
Na ₂ SO ₄	251	220	31	Market for sodium sulfate, anhydride, RER
Peretikkahappo	280	280	0	Acetic acid production, product in 98 % state, RER
Viimeistelykemikaali	48	48	0	Ethoxylated alcohol (AE3) production, coconut oil, RER
Al ₂ SO ₄	250	0	250	Market for aluminium sulfate, powder, GLO
1000 kg CCA 1 energia	Input	Output	Tase	
Energia, (GJ)	7,89		7,2	Heat Fin
Sähkö, (MWh)	0,5268		0,5268	Electricity, Finland, 2007-2011
1000 kg CCA 1 Vesi	Input	Output	Tase	
Vesi sisään/ulos	616	834	-218	-
Vesi prosessi	235	17	218	-
Vesi jäädytys	765	765	0	-



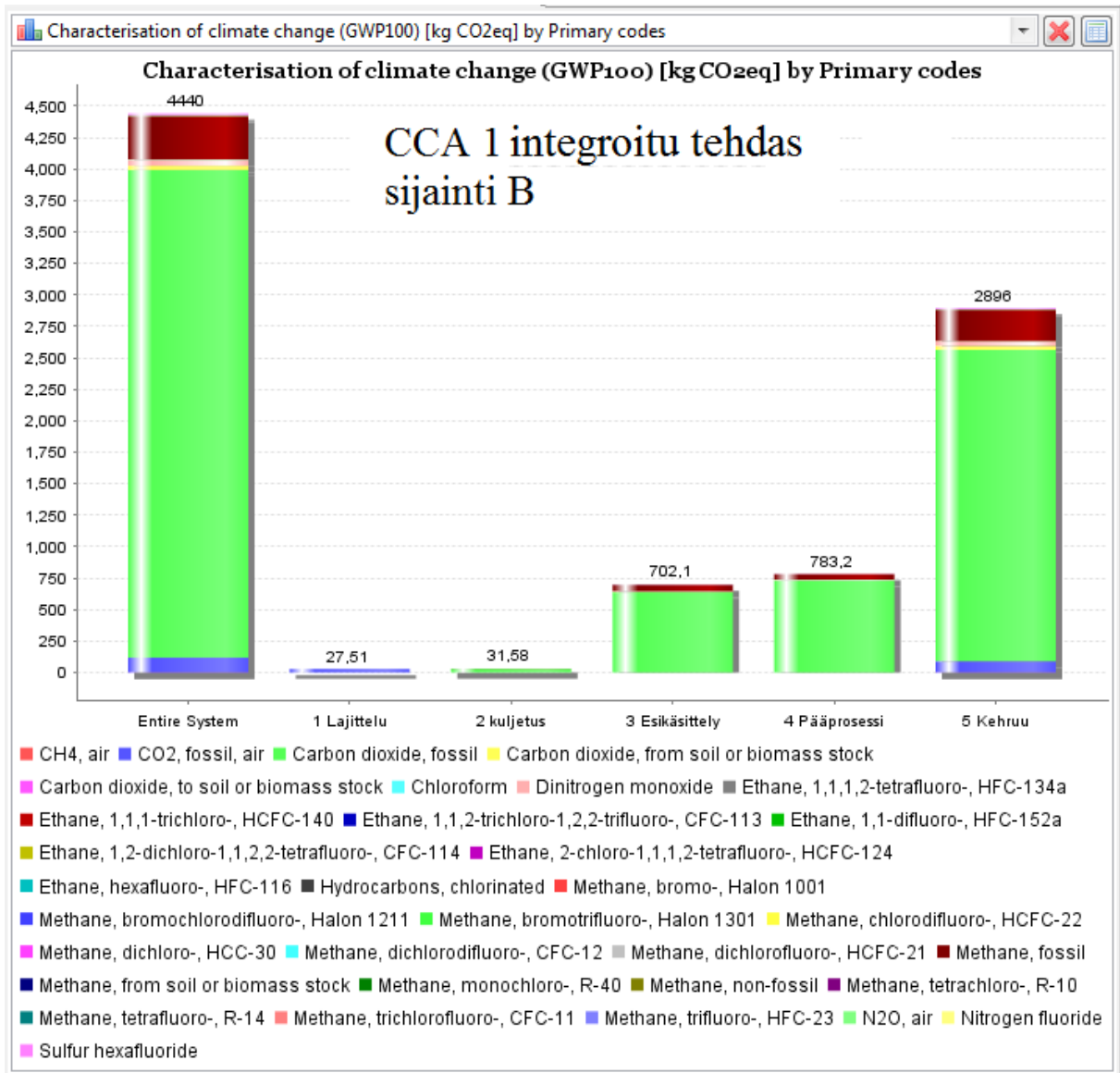
Kuva 1. CCA 1 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 1. CCA 1 integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 1. CCA 1 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa B.



Kuva 1. CCA 1 integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa B.

Taulukko 1. CCA 2 esikäsitellyn agglomeraatin tiedot

1000 kg CCA 2	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
Poistopuuvilla	1254	1122	132	-
NaOH	38	0	38	Market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
H ₂ O ₂	41	41	0	Market for hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
H ₂ SO ₄	46	0	46	Market for sulfuric acid
1000 kg CCA 2 energia	Input	Output	Tase	
Energia, (GJ)	8,221	0	8,220	Heat Fin
1000 kg CCA 2 vesi	Input	Output	Tase	
Vesi pesu	14530	0	1453	-

Taulukko 2. CCA 2 pääprosessin agglomeraatin tiedot

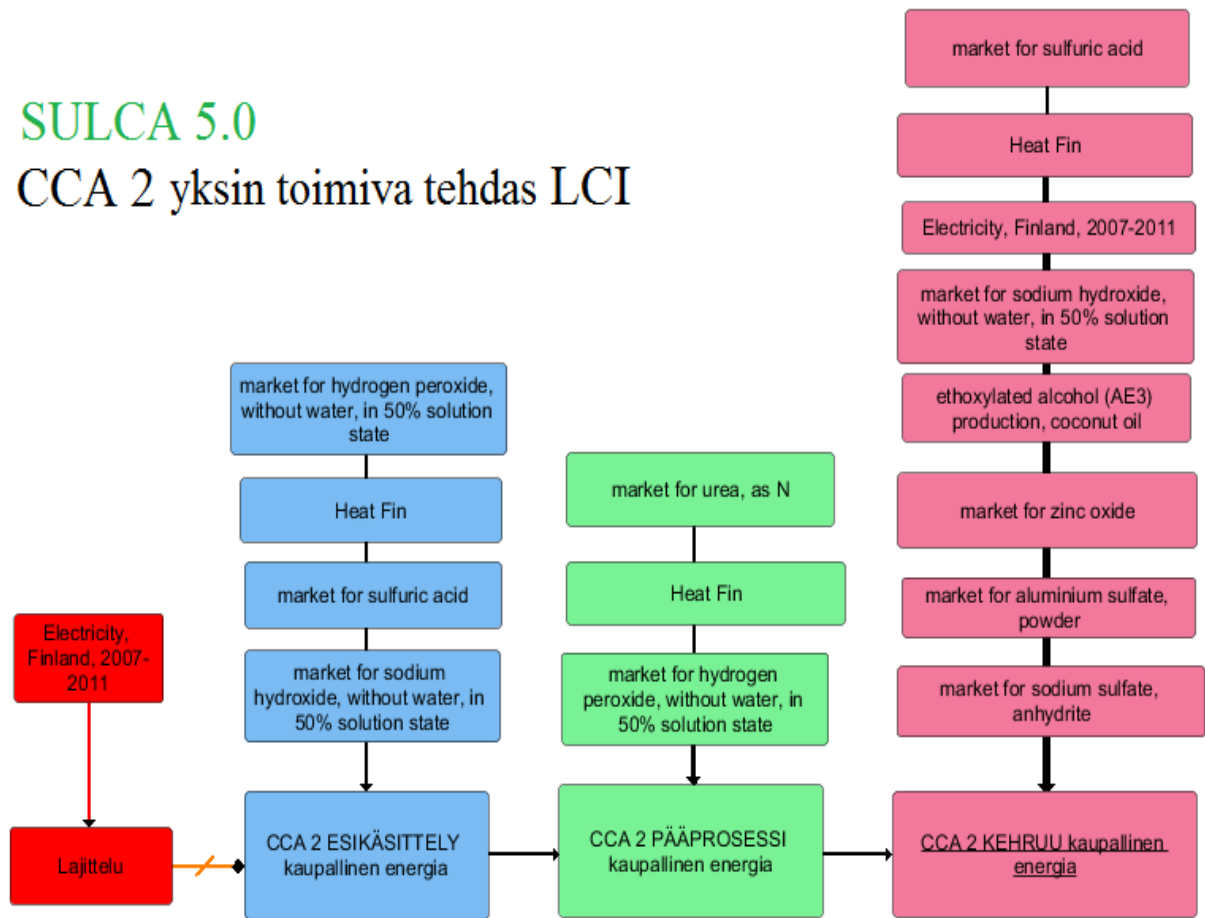
1000 kg CCA 2	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
Poistopuuvilla (sisään) CCA (ulos)	1122	1207	15	-
H ₂ O ₂	26	4	22	Market for hydrogen peroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
Urea	105	105	0	Market for urea, as N, GLO
1000 kg CCA 2 energia	Input	Output	Tase	
Energia, (GJ)	4,8		3,679	Heat Fin

Taulukko 1. CCA 2 kehruprosessin agglomeraatin tiedot

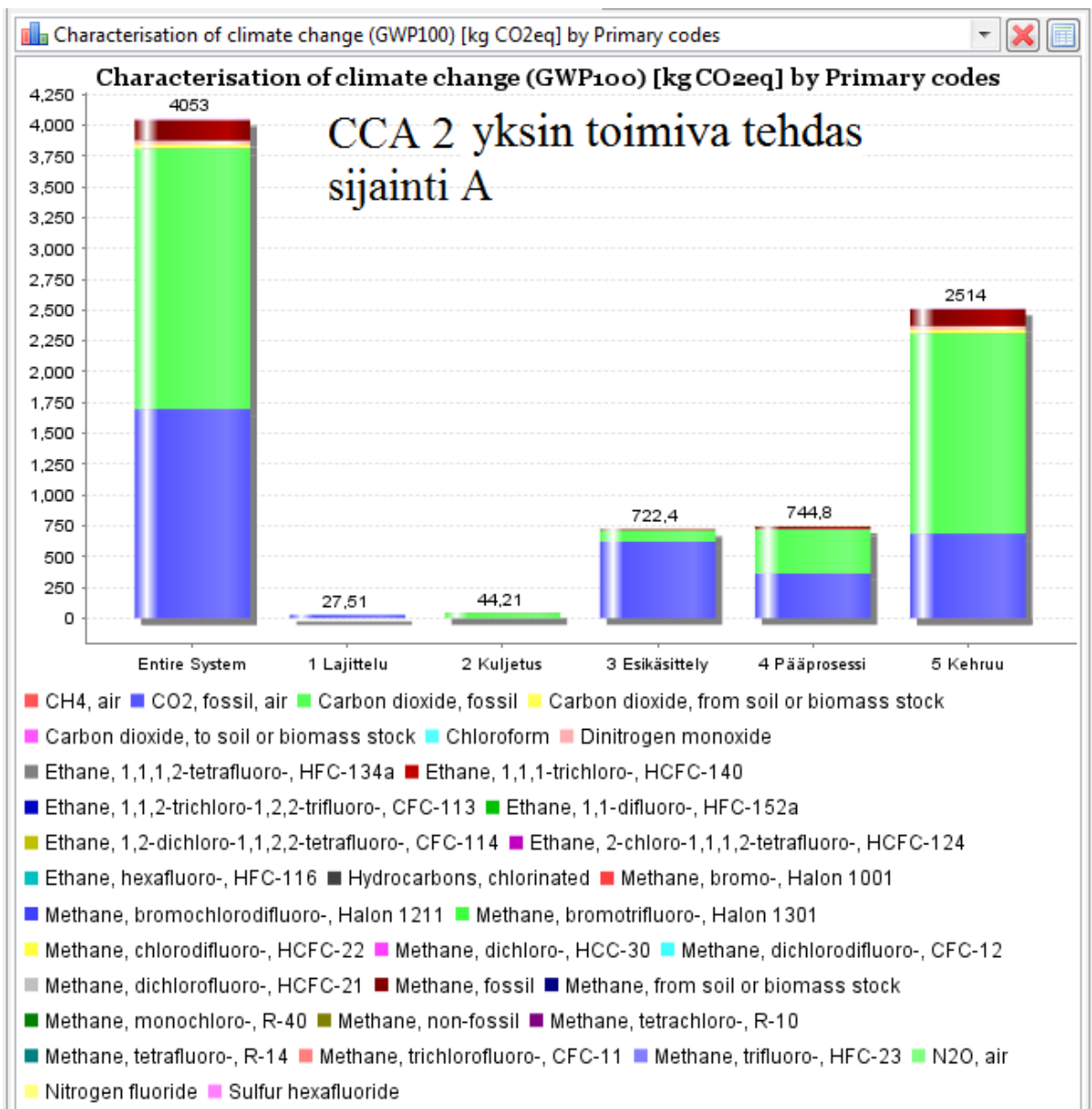
1000 kg CCA 2	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
CCA	1207	1000	7	-
NaOH	184	0	184	Market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
Urea	105		0	Market for urea, as N, GLO
ZnO	171	0	171	Market for zincoxide, GLO
H ₂ SO ₄	227	0	227	Market for sulfuric acid
Na ₂ SO ₄	31	0	31	Market for sodium sulfate, anhydride, RER
Viimeistelykemikaali	48		0	Ethoxylated alcohol (AE3) production, coconut oil, RER
Al ₂ SO ₄	50	0	50	Market for aluminium sulfate, powder, GLO
1000 kg CCA 2 energia	Input	Output	Tase	
Energia, (GJ)	7,89	0	7,89	Heat Fin
Sähkö, (MWh)	0,5268		0,5268	Electricity, Finland, 2007-2011
1000 kg CCA 2 vesi	Input	Output	Tase	
Vesi prosessi	11790	0	11790	-
Vesi jäädytys	3500	0	3500	-

SULCA 5.0

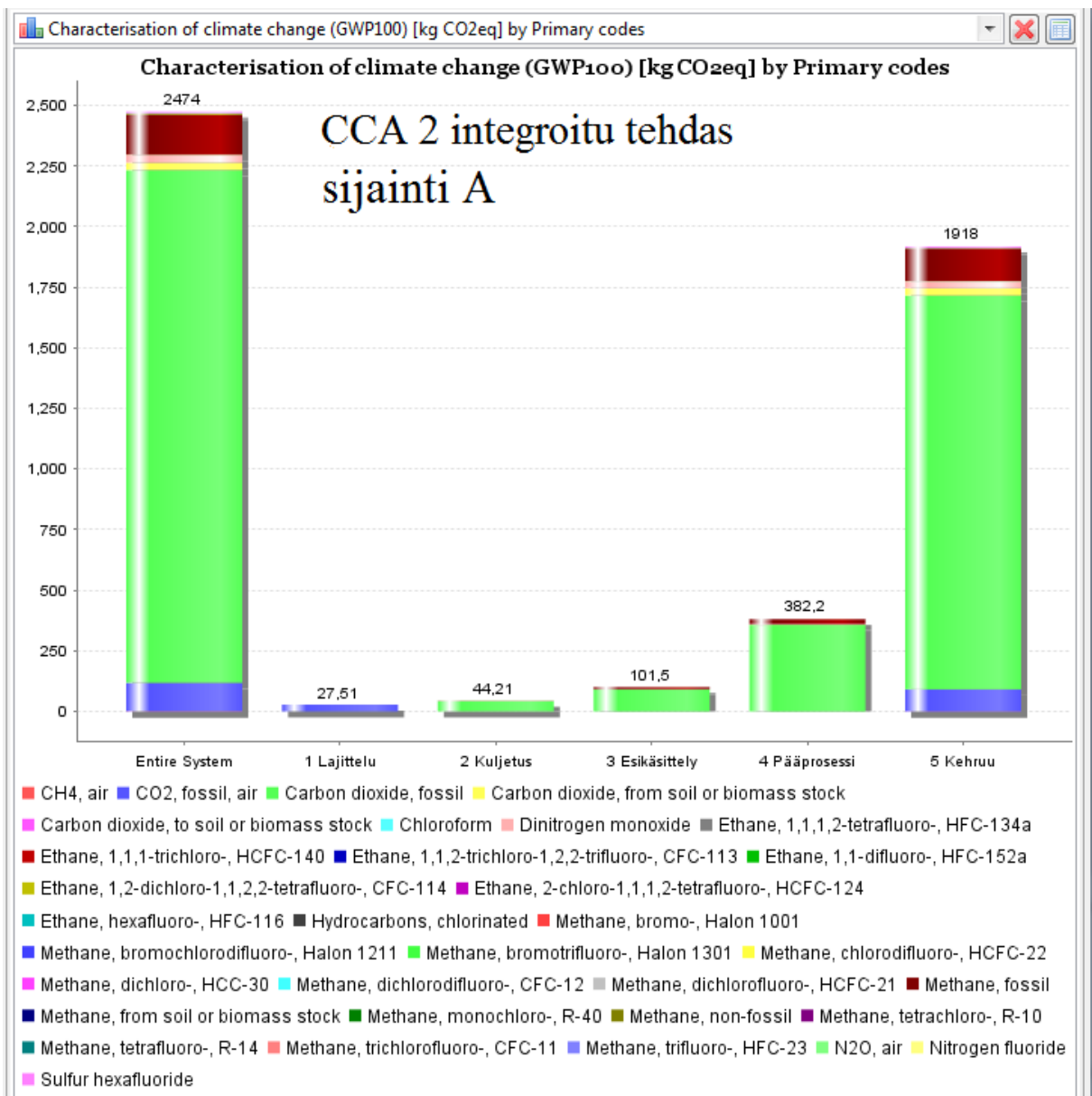
CCA 2 yksin toimiva tehdas LCI



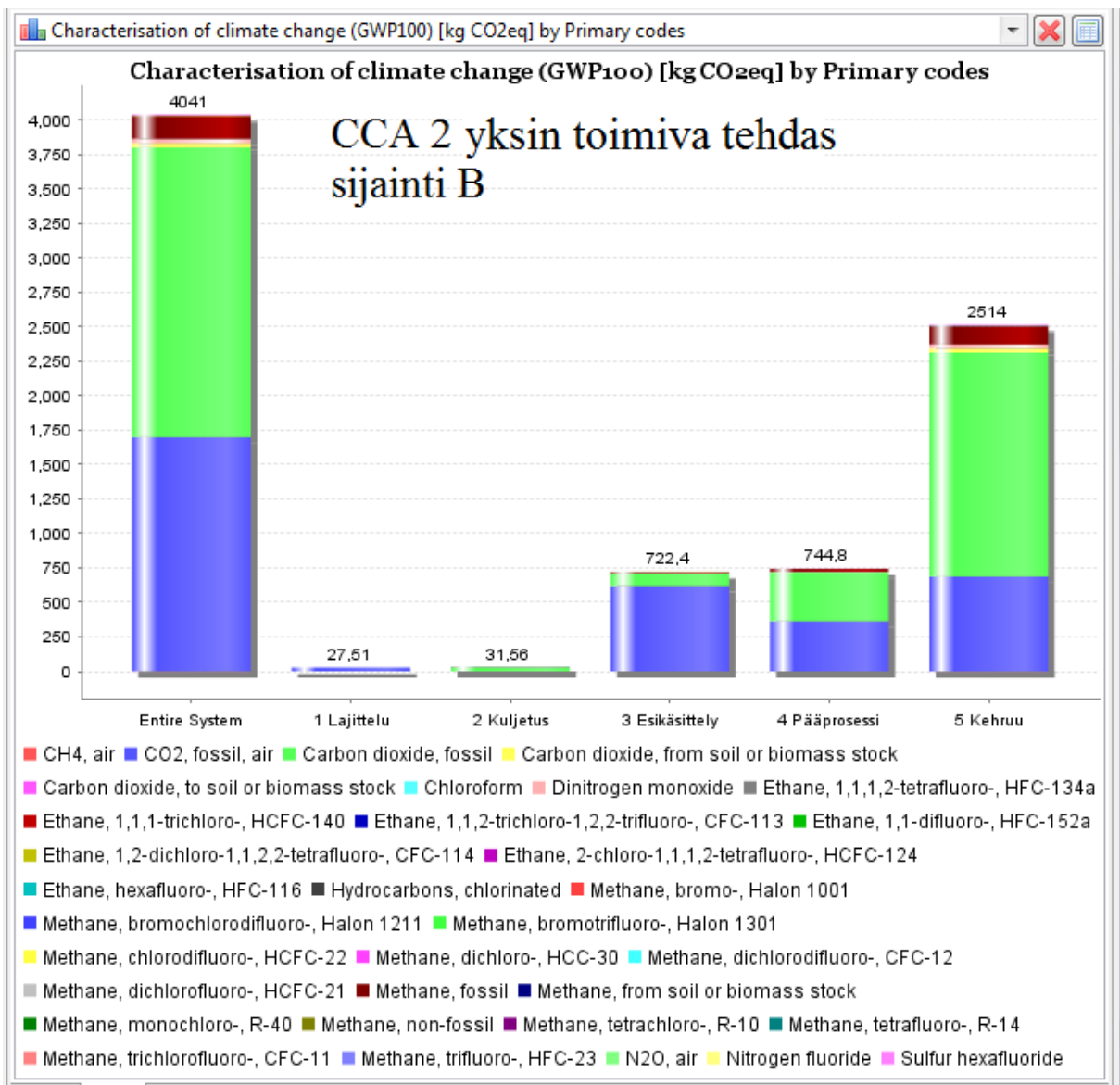
Kuva 1. CCA 2 yksin toimiva tehdas.



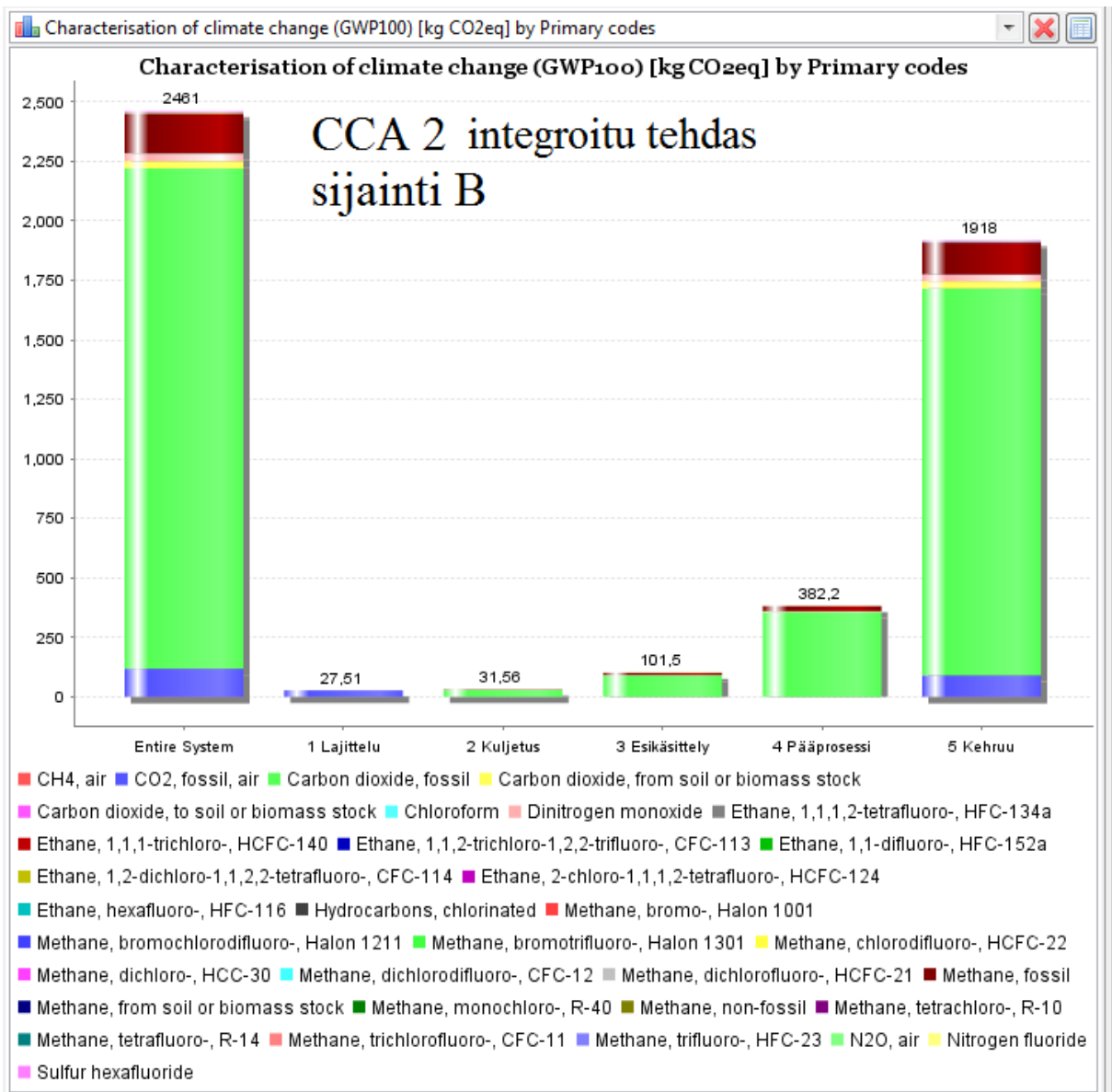
Kuva 1. CCA 2 yksin toimivan tehtaän alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 1. CCA 2 integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 1. CCA 2 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa B.



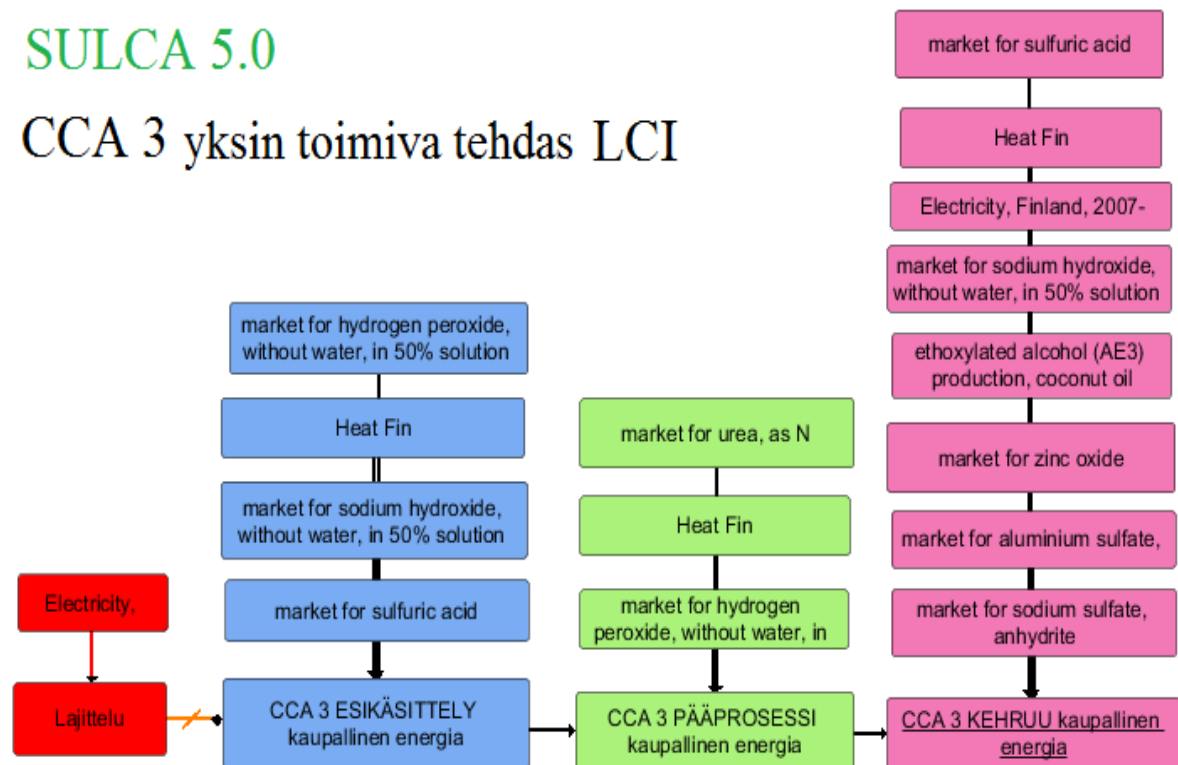
Kuva 1. CCA 2 integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa B.

Taulukko 1. CCA 3 kehruprosessin agglomeraatin tiedot

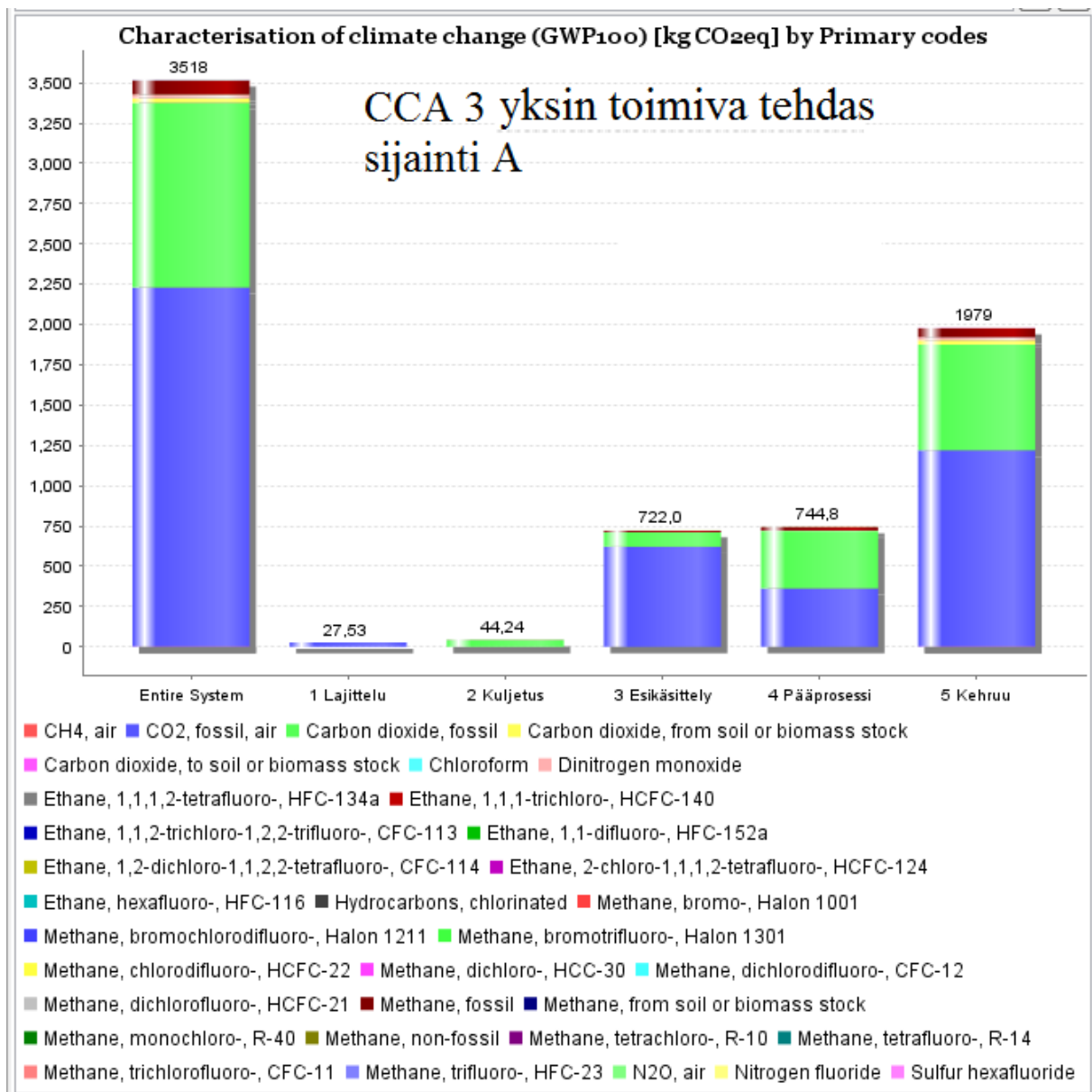
1000 kg CCA 3	Input	Output	Tase	Liitettävä Ecoinvent 3.3- tieto
CCA	1207	1000	7	-
NaOH	184	0	184	Market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO
Urea	105		0	Market for urea, as N, GLO
ZnO	171	0	171	Market for zincoxide, GLO
H ₂ SO ₄	227	0	227	Market for sulfuric acid
Na ₂ SO ₄	31	0	31	Market for sodium sulfate, anhydride, RER
Viimeistelykemikaali	48		0	Ethoxylated alcohol (AE3) production, coconut oil, RER
Al ₂ SO ₄	50	0	50	Market for aluminium sulfate, powder, GLO
1000 kg CCA 3 energia				
Energia, (GJ)	7,890	0	2,827	Heat Fin
Sähkö, (MWh)	3,627		4,645	Electricity, Finland, 2007-2011
1000 kg CCA 3 vesi				
Vesi prosessi	11790	0	11790	-
Vesi jäädytys	3500	0	3500	-

SULCA 5.0

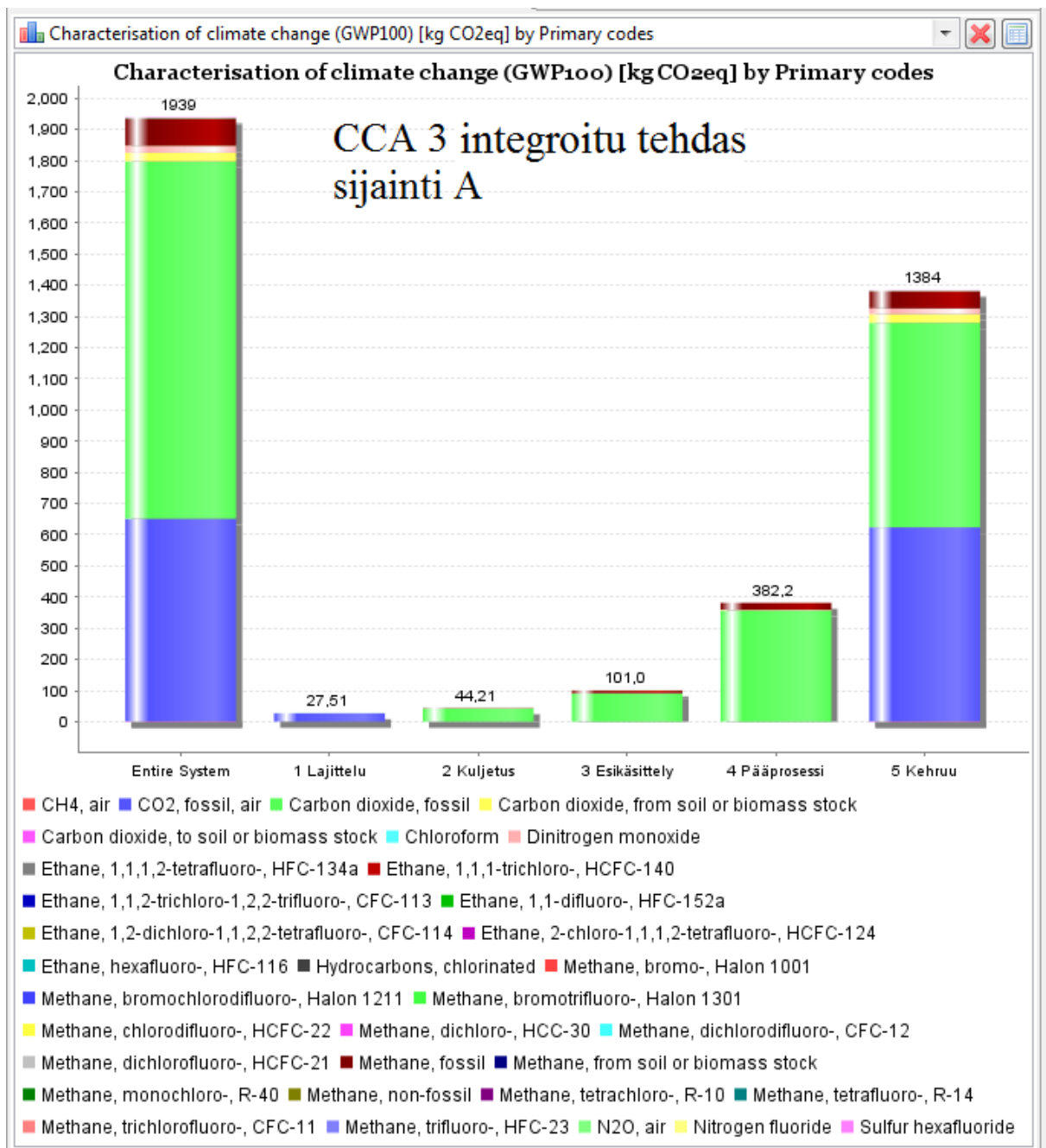
CCA 3 yksin toimiva tehdas LCI



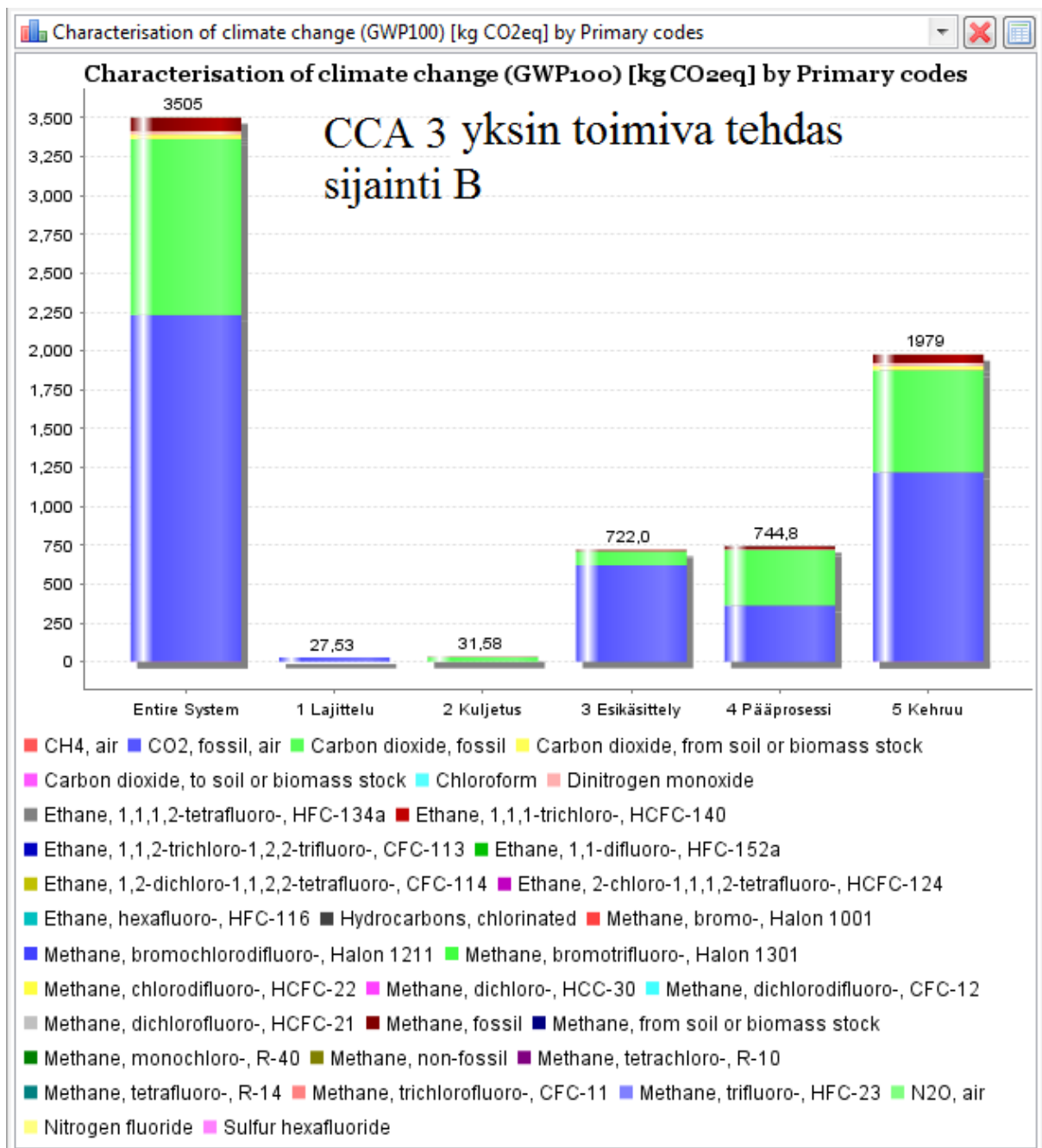
Kuva 1. CCA 3 yksin toimiva tehdas.



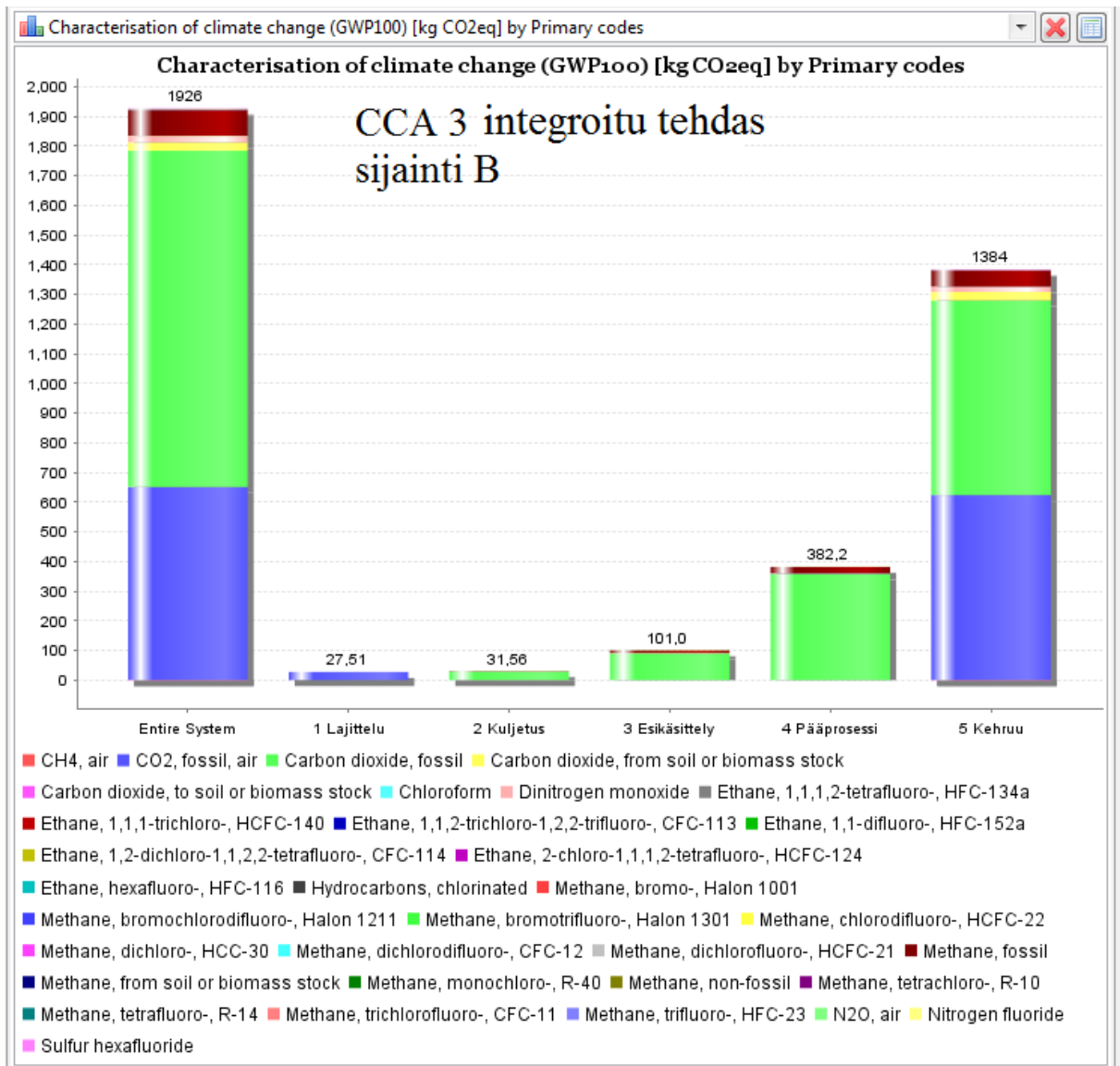
Kuva 1. CCA 3 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 1. CCA 3 integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa A.



Kuva 1. CCA 3 yksin toimivan tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa B.



Kuva 1. CCA 3 integroidun tehtaan alkuperäinen GWP-diagrammi paikassa B.