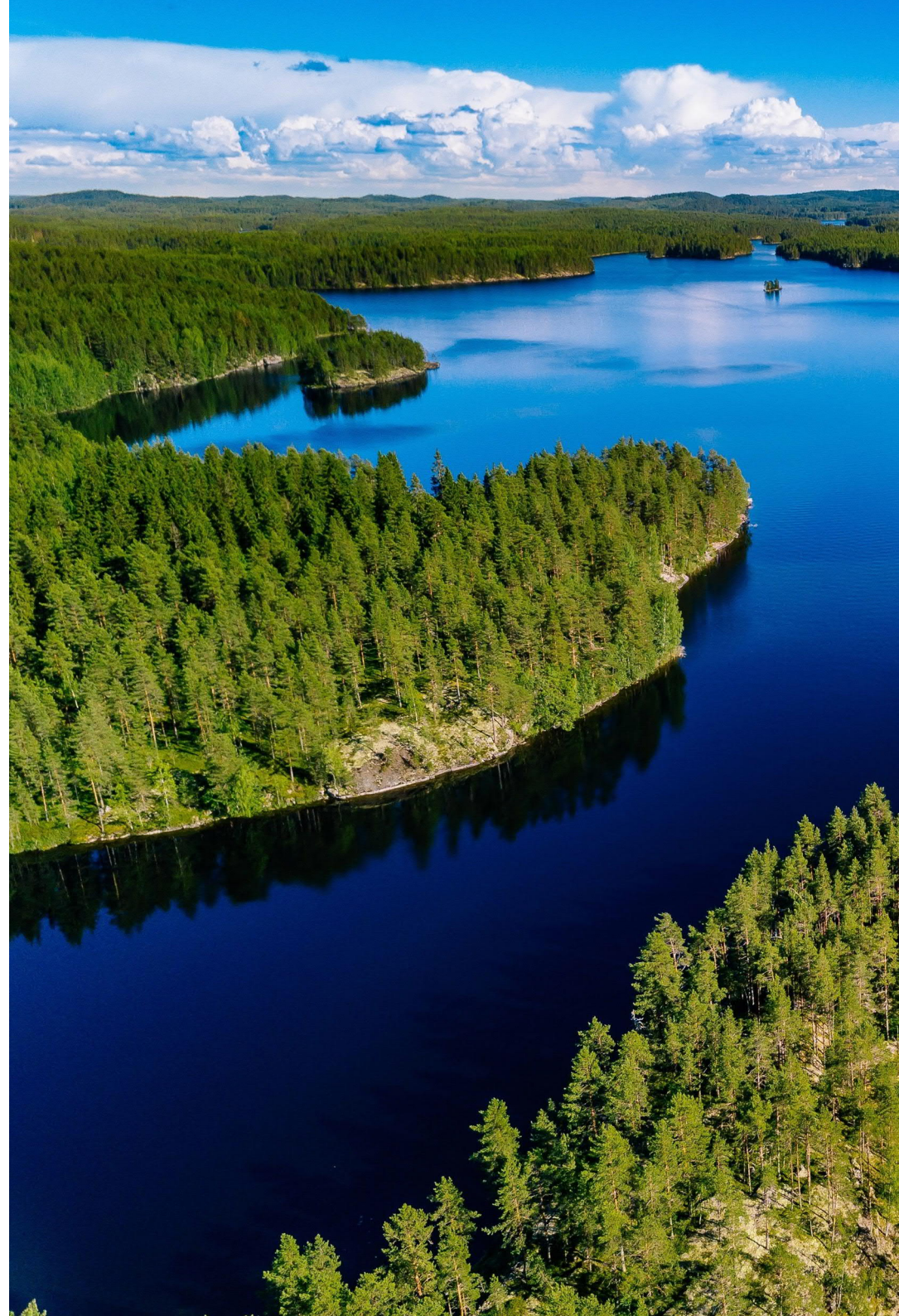


METSÄTEOLLISUUDEN TEHDASPROSESSIEN RAVINNETASE- JA KÄDENJÄLKISELVITYS

METSÄTEOLLISUUS RY

ENV2300

26.10.2021



Tiivistelmä

Työn lähtökohdat ja rajaukset

Suomen ravinnevisiossa Maa- ja metsätalousministeriö on asettanut tavoitteeksi kansallisesti toimivien kierrätysravinnemarkkinoiden toteuttamisen vuoteen 2030 mennessä. Ympäristöministeriön kiertotalouden edistämishjelmassa ehdotetaan tavoitteita luonnonvarojen käytölle sekä toimenpiteitä, joilla hiilineutraalista kiertotalousyhteiskunnasta tulee taloutemme kestävä perusta vuonna 2035.

Kiertotaloudessa ja ravinteiden kierrätyksessä EU-tason sääntelyllä on merkittävä rooli, koska sisämarkkinoilla tuotteiden ja palveluiden tulisi liikkua vapaasti. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (Green Deal, 2019) on keskeinen toimenpidekokonaisuus, jolla ohjataan EU:ta kohti hiilineutraaliutta vuoteen 2050 mennessä. Samalla edistetään kiertotaloutta sekä luodaan uusioraaka-aineiden markkinoita. EU:n kiertotalouden toimintasuunnitelma ja useat direktiiviuudistukset ovat osa Green Deal -pakettia.

Tässä selvityksessä tarkastellaan Suomen metsäteollisuuden tehdasprosesseja ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta ja kuvataan koko toimialan tehdasprosessien ravinnetase ja -kädenjälki. Lähestymistavaksi on valittu metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnetaseen selvittäminen koko Suomen mittakaavassa, sekä neljän tehdas- tai tehdasintegraattikohtaisen esimerkin tasolla. Tehtaiden näkökulma on huomioitu erityisesti ravinteiden kierrätykseen liittyvien hyvien tekniikoiden ja käytäntöjen kuvauksessa.

Ravinnekädenjälki kuvaa metsäteollisuuden positiivista vaikutusta ravinteiden kierrättämisessä. Selvityksessä tarkastellaan ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksia erityisesti

metsäteollisuudessa, metsä- ja maataloudessa sekä uusissa puupohjaisissa ratkaisuissa.

Selvityksen rajauksena toimii metsäteollisuuden tehdasprosessit. Puunhankinta ja sen vaikutukset ravinnetaseeseen ja ravinteiden kiertoon on rajattu selvityksen ulkopuolelle. Selvitykseen ei myöskään sisälly ravinteiden kierto metsissä, vesistöissä ja sivuvirtojen hyötykäyttökohteissa. Tasetarkastelun ulkopuolelle jäävät lisäksi materiaalivirrat, jotka eivät sisällä ravinteita.

Metsäteollisuuden ravinnepitoiset sivuvirrat

Metsäteollisuudessa puun kaikki osat hyödynnetään tarkasti ja lähes kaikki metsäteollisuuden sivutuotteet hyödynnetään edelleen jatkoprosesseissa. Sivuvirrat sisältävät merkittävän osan metsäteollisuuden prosesseissa kiertävistä ravinteista. Typpi, fosfori, kalium ja kalsium ovat tässä selvityksessä erityisen kiinnostuksen kohteina, koska ne ovat pääravinteita, joita lisätään lannoitteina sekä metsä- että viljelymaille. Fosfori on lisäksi uusiutumaton luonnonvara ja sitä on maapallolla rajallisesti, joten sen kierrättäminen on tärkeää. Metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnekiertoon pääravinteita tulee etenkin puuraaka-aineen mukana, mutta myös muista lähteistä eri vaiheissa tuotantoketjuja.

Volyymiltään merkittävin metsäteollisuuden sivuvirroista on puun kuori, joka on varsinaista puuta ravinnepitoisempaa. Valtaosa kuoresta päättyy energiantuotantoon poltettavaksi korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Energiantuotantoon toimitetaan myös metsäteollisuudessa syntyviä lietteitä. Ravinteet, fosfori, kalium ja kalsium, rikastuvat polton lopputuotteena syntyvään tuhkaan. Puupohjaisia sivuvirtoja ovat myös puru ja hake, joista suurin osa palautetaan takai-

sin tuotantoprosesseihin. Merkittäviä muita metsäteollisuuden sivuvirtoja ovat muun muassa meesa ja viherlipeäsakka.

Pääosa tuhkaista hyödynnetään maarakentamisessa korvaamaan neitseellisiä mineraaliaineksia, mutta ravinteet eivät päädy takaisin hallittuun ravinnekiertoon korvaamaan neitseellisistä raaka-aineista valmistettuja lannoitteita. Tuhkaa ja jonkin verran muita sivuvirtoja, kuten lietteitä ja meesaa, hyödynnetään myös lannoitteena.

Loppusijoitukseen kaatopaikalle toimitetaan sivuvirroista vain pieni osa, lähinnä viherlipeäsakkaa. Kaatopaikalle metsäteollisuuden jätteitä päätyy tuotantoon suhteutettuna 94 % vähemmän kuin 1990-luvun alussa. Viherlipeäsakan vaikea hyödynnettävyys johtuu lähinnä sen koostumuksesta. Myös viherlipeäsakalle on etsitty hyötykäyttökohteita.

Typpi kiertoon kuoren maanparannuskäyttöä lisäämällä

Muihin pääravinteisiin verrattuna vain pieni osa sivuvirtojen tyyppistä päätyy hallittuun ravinnekiertoon. Energiakäytössä sivuvirtojen sisältämä typpi vapautuu ilmaan. Lietteiden maarakennuskäytössä typpi ei myöskään päädy hallittuun ravinnekiertoon.

Kuoren hyötykäytön lisääminen viherrakentamisessa tai kompostin tukiaineena on potentiaalisin reitti lisätä typen kierrätystä. Viherrakentamisessa kuorikate parantaa sadeveden imeytymistä kasvien juuriston käyttöön, suojaa maanpintaa kuivumiselta ja eroosiolta sekä parantaa hyödyllisten pieneliöiden elinolosuhteita. Kompostoinnissa se lisää rakenteen ilmatilaa ja tasapainottaa ravinnekoostu-

musta. Kuori on metsäteollisuuden oman bioenergiantuotannon tärkein raaka-aine, jonka korvaaminen jollakin tehdään ulkopuolelta tulevalle polttoaineella ei ole välttämättä kustannustehokasta tai kestävää. Sen kuljettaminen pitkiä matkoja ei myöskään ole kustannustehokasta eikä ilmastoystävällistä.

Fosfori ja kalium kiertoon tuhkalannoitteena

Erityisesti fosforilannoitteiden suuri merkitys ravinnontuotannossa ja toisaalta maapallon fosforivarantojen hupeneminen on tehostanut ravinteiden kierrätyksen menetelmiä. Vaikka sivumateriaalien energiahyötykäytössä typpi menetetäänkin, muiden ravinteiden osalta tilanne on parempi. Vuonna 2019 sivuvirtojen sisältämästä fosforista ja kaliumista noin neljäsosa päätyi ravinnekierrätykseen. Tuhkan ravinnekäytön lisääminen on merkittävä keino ravinnekierrätyksen edelleen parantamisessa.

Tuhka soveltuu erityisen hyvin metsälannoitteeksi runsastyypisille ja ojitetuille turvemaille, joiden rajoittavana tekijänä on fosforin ja kaliumin saatavuus. Tuhkaa voidaan käyttää myös peltolannoituksessa, jolloin tuhkan hyödyntämistä rajoittavat sen sisältämät raskasmetallit. Tuhkan lannoitehyödyntämisen yksi etu on sen helppo kuljetettavuus. Tuhkalannoitus hillitsee lisäksi ilmastomuutosta lisäämällä puuston kasvua ja siten hiilensidontaa pitkällä aikavälillä.

Kalsium hyötykäyttöön

Kalsiumia esiintyy erityisen runsaasti meesassa, meesatuhkassa/kalkkipölyssä, viherlipeäsakassa ja pastalietteisissä. Kalsiumia sisältäviä sivuvirtoja hyödynnetään jonkin verran lannoitteena. Vuonna 2019 sivuvirtojen sisältämästä kalsiumista arviolta neljäsosa päätyikin ravinnekierrätykseen.

Ravinteiden kierrätyksen haasteet ja mahdollisuudet metsäteollisuudessa

Metsäteollisuudessa on totuttu käyttämään luonnonvaroja tehokkaasti ja kestävästi, ja kaatopaikoille ja vesiin päätyykään enää vain vähän ravinteita. Myös typen oksidien päästöt ilmaan ovat huomattavasti pienentyneet. Ravinteiden kierrätykseen on herätty erityisesti maapallon fosforivarantojen hupenemisen myötä.

Uusilla toimintatavoilla ja innovaatioilla on keskeinen rooli kierrätyspotentiaalın valjastamisessa. Ravinteiden kierron ja kierrätysasteen seuraaminen, tekeminen näkyväksi ja toimenpiteiden kohdistaminen oikein on tärkeää kehityksen mahdollistamiseksi. Metsäteollisuuden tutkimus- ja kehittämispanos on merkittävä ravinteiden kierrätyksen edistämisen näkökulmasta. Uusilla teknologioilla on mahdollista poistaa tuhka puuperäisiä raskasmetalleja ja parantaa sen käsiteltävyyttä, jolloin entistä monipuolisempi hyödynttäminen etenkin maataloudessa on mahdollista.

Monissa tehtaissa on kehitetty ja otettu käyttöön toimivia käytäntöjä, joita voidaan tulevaisuudessa toteuttaa laajemmin ja parantaa metsäteollisuussektorin ravinnekierrätyksen kokonaistilannetta. Esimerkiksi jätteiden käsittelyn reaktivesiä käytetään jätevedenpuhdistamon typen lähteenä tai metsäteollisuuden jätevesiä käsitellään yhdessä runsaasti ravinteita sisältävien jätevesien kanssa, jolloin vähennetään ostoravinteiden käyttöä ja vesistöpäästöjä.

Ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksia tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti. Sivuvirtojen hyödynnettävyyttä voi rajoittaa niiden koostumus tai haitta-ainesisältö. Ravinteiden kierrätyksessä on varmistettava, että toiminta on kokonaisuutena kestävä, eikä johda taloudellisesti eikä ympä-

ristön kannalta epäedullisiin kokonaisratkaisuihin esimerkiksi pitkien kuljetusmatkojen vuoksi. Ravinteiden alueellinen tarve ja kysyntä eivät välttämättä vastaa tuotantoa. Alueelliset erot lannoitustarpeessa ovat suuria.

Lainsäädäntöohjauksella on suuri merkitys ravinteiden kierrätyksen laajentamisen kannalta EU:ssa ja kansallisesti. Kierrätysmateriaalien markkinoita tulee edelleen vahvistaa ja sivutuotteiden ja jätteiden hyötykäytön lainsäädäntökehystä nykyisestä sujuvoittaa.

Metsäteollisuuden tuotteiden globaalit markkinat kasvavat ja innovatiivisilla tuotteilla on entistä suurempi rooli koko sektoria ajatellen. Tulevaisuudessa uusiutuvista luonnonvaroista valmistetut materiaalit ja tuotteet ovat entistä keskeisempiä kiertotalouden tavoitteiden toteuttamisessa. Ravinteiden kierron kannalta useimmilla näistä tuotteista ei kuitenkaan ole isoa merkitystä – esimerkiksi bioetanoli tai sellu eivät sisällä merkittäviä määriä ravinteita. Sen sijaan uudenlaiset puupohjaiset ratkaisut tarjoavat ratkaisuja ilmastomuutoksen torjuntaan ja voivat korvata materiaaleja, joiden tuotantoon liittyy merkittäviä kestävyysvaasteita (esimerkiksi bioetanoli polttoaineena tai selluloosapohjaiset kuidut puuvillan ja viskoosin korvaajana). Puupohjaisista sivuvirroista pyrolyysillä valmistetulla biohiilellä on lukuisia korkean jalostusarvon tuotesovelluksia liittyen mm. veden ja ilmanpuhdistukseen, ravintoon, kosmetiikkaan ja muihin vastaaviin tuotteisiin, joissa biohiili korvaa fossiilisia materiaaleja. Mikro- ja nanoselluloosapohjaisilla tuotteilla voidaan poistaa vedessä olevia haitta-aineita ja myös ravinteita, mikä vaikuttaa positiivisesti metsäteollisuuden ravinnejäden jälkeen.

Sisällys

Tiivistelmä.....	2	5 Tulosten tarkastelu.....	48
Sisällys	5	6 Ravinnekädenjälki.....	50
1 Johdanto	6	6.1 Ravinteiden kierrätyksen potentiaali ja haasteet	50
2 Metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnekierrat	7	6.2 Suomalaisia esimerkkejä ravinteiden kierrätyksestä	57
2.1 Keskeiset materiaalivirrat.....	7	7 Johtopäätökset ja toimenpidesuositukset	62
2.2 Keskeiset kemiallisen metsäteollisuuden prosessit....	9		
2.3 Ravinnekierrat	12		
2.3.1 Typen kierto.....	12		
2.3.2 Fosforin kierto.....	13		
2.3.3 Kaliumin kierto	14		
2.3.4 Kalsiumin kierto	14		
2.4 Keskeiset sivuvirrat ja niiden hyötykäyttö.....	15		
2.4.1 Kuori, kuorihiekka, puru ja hake.....	15		
2.4.2 Tuhkat	16		
2.4.3 Kalkkijakeet	17		
2.4.4 Viherlipesäkkeet	17		
2.4.5 Lietteet.....	17		
3 Aineisto, menetelmät ja rajaukset.....	20		
3.1 Suomen metsäteollisuuden laskelmat.....	20		
3.2 Tehdasympäristökohtaiset laskelmat.....	21		
3.3 Epävarmuustekijät	22		
4 Ravinnetaseet	23		
4.1 Suomen metsäteollisuuden ravinnetaseet	23		
4.1.1 Typpitase.....	24		
4.1.2 Fosforitase.....	25		
4.1.3 Kaliumtase.....	26		
4.1.4 Kalsiumtase	27		
4.2 Tehdasympäristökohtaiset ravinnetaseet.....	28		
4.2.1 Stora Enso Imatra.....	28		
4.2.2 MetsäFibre Äänekoski	33		
4.2.3 UPM Jämsänkoski	38		
4.2.4 UPM Kaukas.....	43		

1 Johdanto

Tässä työssä kuvataan Suomen metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnetase ja -kädenjälki. Mukana tarkastelussa ovat pääravinteet typpi, fosfori, kalium ja kalsium. Selvityksessä on tarkasteltu metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnetasetta koskien sekä koko Suomea että tehdasympäristökohtaisin esimerkein.

Kädenjälki kuvaa metsäteollisuuden tehdasprosessien positiivista vaikutusta ravinteiden kierrättämiseen. Selvityksessä on tarkasteltu ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksia mm. metsäteollisuudessa, metsä- ja maataloudessa sekä ravinteiden hyödyntämistä uusiin puupohjaisiin ratkaisuihin. Puunhankinta ja sen vaikutukset ravinnetaseeseen on rajattu selvityksen ulkopuolelle.

Työn on tilannut Metsäteollisuus ry. Metsäteollisuus ry:n muodostavat sellu-, paperi-, kartonki- ja pakkausteollisuudessa sekä puutuoteteollisuudessa toimivat 72 jäsenyri-tystä. Se edustaa siten koko Suomen massa-, paperi- ja kartonkiteollisuutta sekä suurinta osaa puutuoteteollisuudesta. Työtä ohjaamaan perustettiin laaja-alainen ohjausryhmä (taulukko 1).

Tilaajan yhteyshenkilönä on toiminut tehdasympäristötoimikunnan sihteeri, ympäristöasiantuntija Aaron Vuola. Selvityksen on toteuttanut Vahanen Environment Oy asiantuntijoinaan DI, FT Esa Salminen, FT Anne Liljendahl, MMT Milja Vepsäläinen ja FM Liina Marttila. Esa Salminen toimi työssä projektipäällikkönä.

Taulukko 1. Ohjausryhmän kokoonpano.

Nimi	Organisaatio
Aaron Vuola	Metsäteollisuus ry
Eerik Ojala	UPM (pj. 18.5. lähtien)
Sanna Pulkkinen	Metsä Group (pj. 18.5. saakka)
Anna Riikka Nickull	Metsä Group
Heini Kukkonen	Stora Enso
Fredrik Blomfelt	Metsäteollisuus ry
Juhani Anhava	Eläkkeellä (Pöyry, BASF ja Outotec 1979–2017)
Jukka Rintala	Tampereen yliopisto
Anneli Pauli	Helsingin yliopisto

2 Metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnekierrot

Suomella on tavoitteena olla ravinnekierrätyksen mallimaa – Suomen ravinnevisiossa on asetettu tavoitteeksi, että vuoteen 2030 mennessä kierrätysravinteilla olisi toimivat markkinat Suomessa. Uusia ravinnetehokkaita hyötykäyttömahdollisuuksia on kehitteillä jatkuvasti ja tavoitteena on vähentää uusiutumattomien ravinteiden kuten fosforin, kaliumin ja kalsiumin käyttöä. Erityisesti fosforilannoitteiden suuri merkitys ravinnontuotannossa ja toisaalta maapallon fosforivarantojen hupeneminen on tehostanut ravinteiden kierrätyksen menetelmiä.

Metsäteollisuudessa syntyy runsaasti ravinteita sisältäviä sivuvirtoja. Typpi, fosfori, kalium ja kalsium ovat tässä selvityksessä erityisen kiinnostuksen kohteina, koska ne ovat kasvien tarvitsemia pääravinneaineita, joita lisätään lannoitteina sekä metsä- että viljelymaille. Metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnekiertoon typpeä, fosforia, kaliumia ja kalsiumia tulee raakapuun lisäksi useista lähteistä prosessien eri vaiheissa.

2.1 Keskeiset materiaaliwirrat

Suomen metsäteollisuuden käyttämän raakapuun määrä oli 71,1 milj. m³ vuonna 2009. Metsäteollisuus voidaan jakaa kahteen pääryhmään: mekaaniseen metsäteollisuuteen ja kemialliseen metsäteollisuuteen. Metsäteollisuuden puuraaka-aineesta noin 40 % käytetään mekaanisessa metsäteollisuudessa ja 60 % kemiallisessa metsäteollisuudessa.

Mekaaninen metsäteollisuus valmistaa erilaisia puutuotteita, kuten sahatavaraa ja vaneria, pääasiassa rakentamiseen. Mekaanisessa metsäteollisuudessa syntyy lähinnä puupohjaisia sivuvirtoja kuten kuorta, purua ja haketta. Vuonna 2019 9,6 milj. m³ metsäteollisuuden sivuvirtana syntynyttä purua ja haketta toimitettiin takaisin metsäteollisuuden prosesseihin raaka-aineeksi.

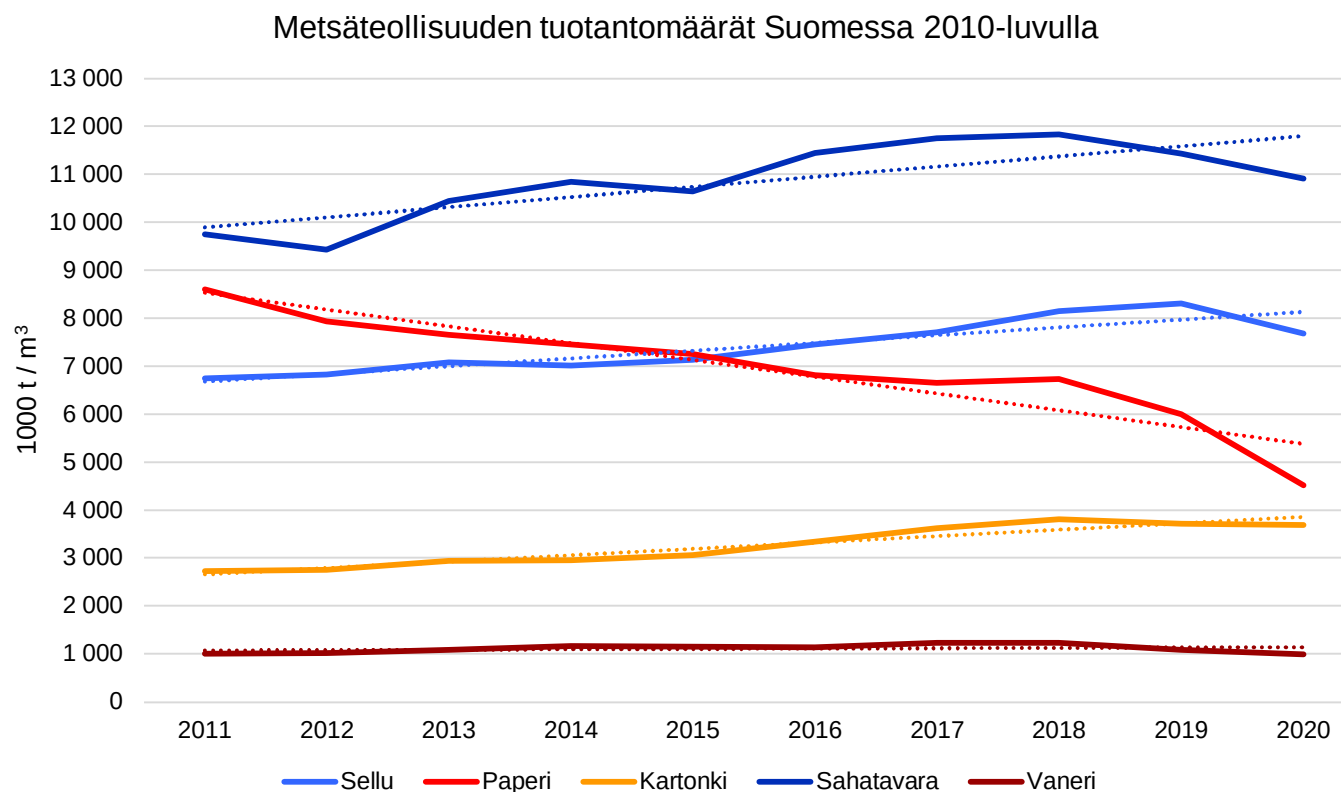
Kemiallisen metsäteollisuuden päätuotteita ovat sellu, kartonki ja paperi. Suomen metsäteollisuudessa valmistettiin paperimassaa eli sellua yhteensä 8 320 tuhatta tonnia vuonna 2019. Valtaosa maailman sellusta valmistetaan sulfaattimenetelmällä. Ravinteiden kierron näkökulmasta sellun valmistusprosessi Suomen eri tehtailla on pääpiirteissään samanlainen. Prosessien eroavaisuudet johtuvat lähinnä laitekoonpanoista sekä sivuvirtojen käsittelyeroista. Kemiallisessa metsäteollisuudessa syntyy paitsi kuorta, myös useita muita sivuvirtoja. Kemiallisen metsäteollisuuden keskeisiä prosesseja, materiaalivirtoja ja syntyviä sivuvirtoja on tarkasteltu lähemmin luvussa 2.2.

Puupohjaisista jakeista tuotetaan lisäksi erilaisia kemianteollisuuden raaka-aineita, ja uusia biotuotteita on kehitteillä.

Metsäteollisuuden tuotantomäärissä on ollut muutoksia 2000-luvulla. Paperintuotannon määrä on ollut laskussa, kun taas sellun ja kartongin tuotantomäärät ovat olleet kasvussa. Vuonna 2016 tuotetun sellun määrä ylitti ensimmäistä kertaa tuotetun paperin määrän. Mekaanisen metsäteollisuuden tuotantomäärissä on ollut vaihtelua, mutta trendi on vuoden 2009 jälkeisen laskusuhdanteen jälkeen ollut kasvussa. Vuosina 2017–2019 sellun tuotanto oli kasvussa ja paperin tuotanto laskussa. Poikkeuksellisen vuoden 2020 aikana myös sellun tuotanto kääntyi laskuun. Vuosi 2020 vaikutti myös mekaanisen metsäteollisuuden tuotantomääriin negatiivisesti. Kartonki nousi vuonna 2021

paperin ohi Suomen tärkeimmäksi metsäteollisuustuotteeksi viennin arvolla mitattuna. Metsäteollisuuden tuotteiden globaalit markkinat kasvavat ja uusilla tuotteilla on entistä suurempi rooli koko sektoria ajatellen. Uusia korkeamman jalostusarvon tärkeitä sovellusalueita ovat mm. puukuitupohjaiset tekstiilit, biopolttoaineet ja -kemikaalit sekä erilaiset pakkausteknologiat.

Metsäteollisuuden tuotantomääriä 2010-luvulla on kuvattu kuvassa 1. Tuotantomäärien muutosten, lainsäädännön ja uuden teknologian vaikutuksia ravinnekierrätyksen näkökulmasta on tarkasteltu lähemmin luvussa 6.



Kuva 1. Metsäteollisuuden tuotantomäärät Suomessa 2010-luvulla. Sellu, paperi ja kartonki on ilmoitettu muodossa 1000 t ja sahatavara ja vaneri muodossa 1000 m³. Lähde: Luonnonvarakeskus, 2021

2.2 Keskeiset kemiallisen metsäteollisuuden prosessit

Sellun valmistus alkaa kuorimolta, jossa tehtaalle saapuva pyöröpuu kuoritaan ja haketetaan pieniksi lastuiksi sellun keittoa varten (kuva 2). Puiden kuori ja ylisuuri hake poltetaan yleensä kuorikattilassa, jossa tuotettua höyryä käytetään sellutehtaalla prosessihöyrynä tai sähköntuotannossa. Polttamisessa syntyy sivutuotteena tuhkaa. Kuori voidaan myös kuljettaa polttoon muualle tai myydä hyötykäyttöön. Kuorimolta ja puun välivarastointikentiltä syntyy myös sivutuotteena kuorihiekkaa, joka on maa-ainekseen ja kuoren mukana tulevaan hiekkaan sekoitettua kuorisilppua ja hienoksi jauhautunutta kuorta.

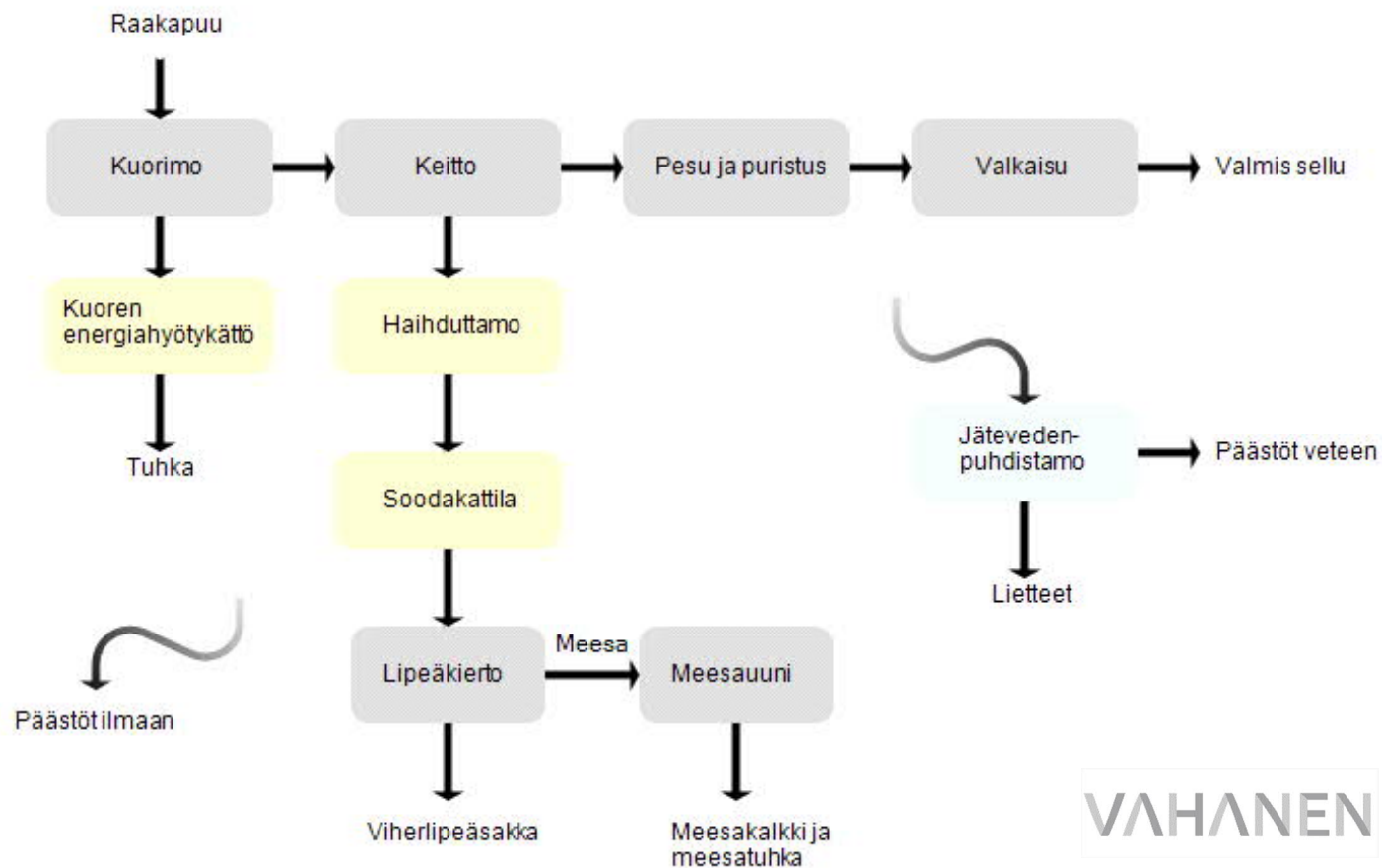
Kuorimolla valmistettua haketta keitetään natriumhydroksidi- ja sulfidiliuoksessa (valkolipeä) korkeassa paineessa, jolloin puu erottuu sellukuiduiksi (kuva 2). Noin puolet keittoon syötetystä puumassasta liukenee keittämisen aikana. Tämän jälkeen sellu pestään, valkaistaan ja kuivataan. Kuivattu sellu leikataan arkeiksi ja paalataan, ja valmis tuote kuljetetaan joko myyntiin tai paperin ja kartongin valmistukseen.

Keiton jälkeen ligniiniä, epäorgaanisia suoloja ja orgaanista ainesta sisältävä mustalipeä erotetaan ja johdetaan yhdessä massan pesuvesien kanssa haihduttamoon, jossa tuotetaan tislaamalla mäntyöljyä. Loput mustalipeästä väkevöidään ja poltetaan soodakattilassa. Soodakattilassa palaa pois mustalipeän orgaaninen aines ja ligniini. Soodakattilalla tuotetaan prosessin tarvitsemää energiaa. Soodakattiloista syntyy suurin osa sellutehtaan NO_x-päästöistä.

Palamaton aines liuotetaan veteen ja liukoiset alkalit muodostavat viherlipeää. Liukoista aineista muodostunut viherlipeä kaustisoidaan kalsiumhydroksidin avulla uudelleen valkolipeäksi, joka kierrätetään uusiokäyttöön keittoon. Liukematon aines on viherlipeäsakkaa, joka erotetaan prosessista. Viherlipeäsakka sisältää lähinnä puusta peräisin olevia metalleja ja pieniä määriä viherlipeää (jota viherlipeäskan käsittelyssä ei saada erotettua kiinteässä muodossa olevasta sakasta). Viherlipeäsakka on koostumukseltaan ongelmallinen, minkä vuoksi se päättyykin useimmiten loppusijoitukseen kaatopaikalle.

Kaustisoinnissa syntyy sivutuotteena meesaa, joka sisältää pääasiassa kalsiumkarbonaattia (CaCO₃). Meesa poltetaan meesauunissa, jossa se muuttuu kalsiumoksidiksi (CaO) eli poltetuksi kalkiksi. Meesakalkkia käytetään prosessissa rinnakkain ostokalkin kanssa, ja sitä voidaan myös myydä tehtaan ulkopuolelle maanparannus- tai lannoitekäyttöön. Meesauunissa syntyy myös meesatuhkaa eli kalkkipölyä, joka erotetaan savukaasuista sähkösuodattimella ja joka voidaan sekoittaa meesakalkkiin tai hyötykäyttää prosessin ulkopuolella. Meesauunin savukaasut sisältävät paljon typen oksideja.

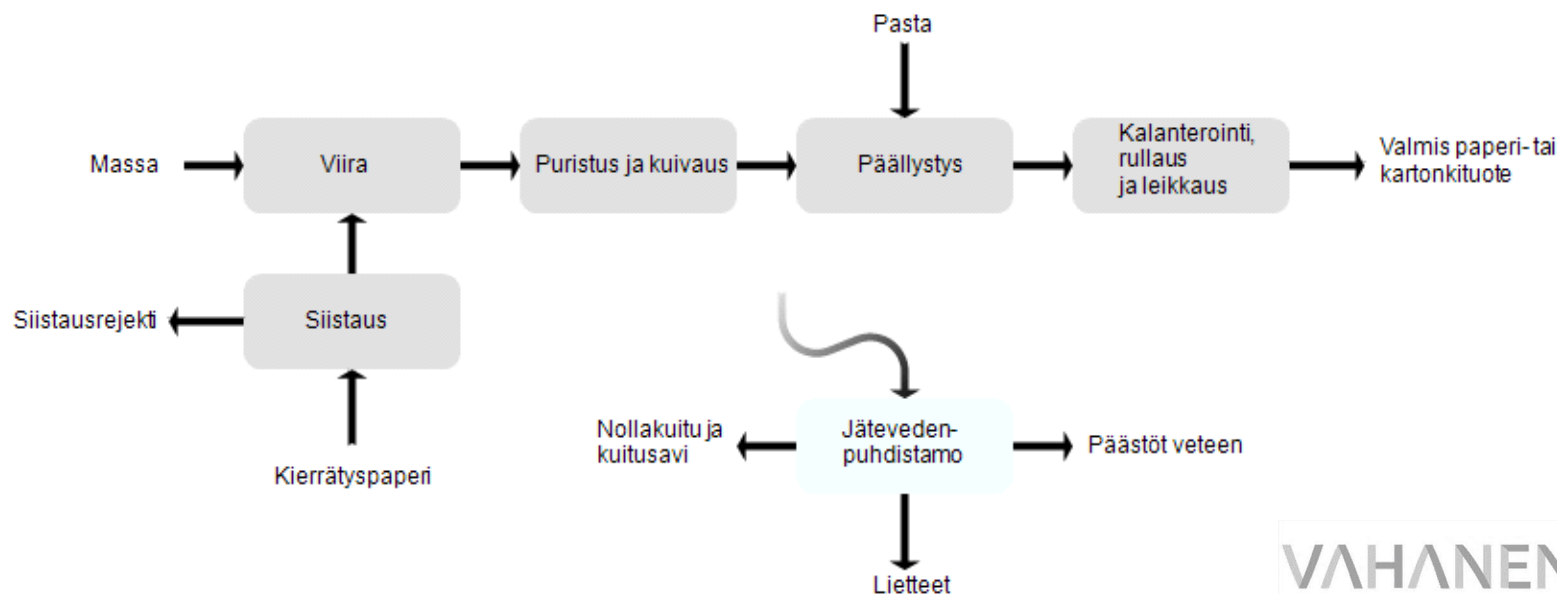
Selluteollisuuden jätevedet käsitellään biologisissa jätevedenpuhdistamoissa (aktiivilietelaitoksissa). Jätevedenpuhdistamoissa syntyvä ravinnepitoinen liete voidaan kuljettaa polttoon, hyötykäyttöön sellaisenaan tai jatkokäsitellä esimerkiksi mädättämössä. Prosessista poistuu lisäksi suuria määriä puhtaita jäähdytysvesiä.



Kuva 2. Tyypillisen sellutehtaan ravinnenäkökulmasta merkittävät prosessit, materiaalivirrat ja sivuvirrat. Puuraaka-aineesta kuorimolla kuorittu kuori päättyy lähes kokonaisuudessaan energiahyötykäyttöön, jossa syntyy sivuvirtana tuhkaa. Muut sellutehtaan merkittävät sivuvirrat syntyvät lipeä- ja kalkkikierrossa sekä jätevedenpuhdistamolla.

Paperin- ja kartonginvalmistus on sellunvalmistukseen verrattuna ravinteiden kierron näkökulmasta yksinkertaisempi prosessi. Paperin ja kartongin raaka-aineena käytetään yleensä kemiallista sellua sekä puusta mekaanisesti hio-malla tai hiertämällä erotettua mekaanista massaa (kuva 3). Raaka-aineena voidaan käyttää myös kierrätyspape-rista siistaamalla valmistettua massaa. Massojen seos joh-detaan viiralle hyvin pienessä kiintoainepitoisuudessa, jol-loin kuituseos levittyy tasaisesti. Pääosa vedestä erotetaan viiraosalla ja palautetaan sen alkuun massan laimennuk-seen. Viiralla muodostuva raina johdetaan koneen puristin- ja kuivausosiin, jossa rainasta poistetaan loput vedestä.

Jäljelle jäänyt paperi- tai kartonkiraina jälkikäsitellään halu-tuksi paperi- tai kartonkituotteeksi. Osa tuotteista päällyste-tään epäorgaanista pigmenttiä ja sideainetta sisältävällä pastalla. Jälkikäsitelyssä paperi- tai kartonki kalanteroi-daan, rullataan ja leikataan valmiiksi tuotteeksi. Paperi- ja kartonkitehtaan jätevedet johdetaan yleensä esiselkeytyk-sen kautta kemimekaaniselle tai biologiselle jätevedenpuh-distamolle. Esiselkeytyksessä erotellaan paperin valmistuk-seen kelpaamaton kuitu ja muu orgaaninen tai epäorgaani-nen kiintoaine. Jätevedenpuhdistamoissa syntyvä liete voi-daan polttaa tai toimittaa hyötykäyttöön sellaisenaan tai jat-kokäsiteltynä.



Kuva 3. Tyypillisen paperi- tai kartonkitehtaan ravinnenäkökulmasta merkittävät prosessit, materiaalivirrat ja sivuvirrat. Paperi- ja kartonkitehtaan merkittävät sivuvirrat syntyvät jätevedenpuhdistamolla.

2.3 Ravinnekierrot

Metsäteollisuuden prosesseihin tulee ravinteita raaka-aineena käytetyn puun, raakavesien, prosessissa käytettyjen liukoisten tai kiinteiden lisäaineiden tai muiden materiaalien (esim. pasta) ja jäteveden käsittelyssä lisättyjen ravinteiden mukana. Ravinteita taas poistuu prosesseista sivuvirroissa, päästöissä ja tuotteissa. Tässä selvityksessä tarkastellaan typpeä (N), fosforia (P), kaliumia (K) ja kalsiumia (Ca).

2.3.1 Typen kiertäminen

Typpeä tulee sellutehtaan prosesseihin puuraaka-aineesta ja jäteveden käsittelyyn lisättävässä typpeä sisältävässä ureassa sekä hyvin pieniä määriä raakavesien mukana. Todettakoon, että jäteveden käsittelyssä typen lähteenä voidaan hyödyntää myös runsaasti typpeä sisältäviä sivuvirtoja.

Puun kuoren typpipitoisuus on huomattavasti korkeampi kuin kuoritun puun typpipitoisuus. Merkittävä määrä puun mukana metsäteollisuuteen tulleesta tyyppistä kulkeutuu siten kuoren mukana joko polttoon kuorikattilaan/voimalaitokseen tai hyötykäyttöön. Kuoren poltossa typpi vapautuu ilmaan typen oksideina (NO_x), joista tärkeimpiä ovat typpi-monoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO_2). Ilmakehään päästetään NO reagoi hapen kanssa muodostaen NO_2 :ta. Typen oksidit aiheuttavat luonnossa vesistöjen ja maaperän happamoitumista ja niillä on korkeina pitoisuuksina haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen ja viihtyvyyteen. Näiden lisäksi erityisesti leijupetikattiloissa vapautuu dityppioksidia

(N_2O) eli ilokaasua, joka on muihin typen oksideihin verrattuna ilmakehässä pitkäikäinen ja myös kasvihuonekaasu. Dityppioksidia muodostuu eniten leijupoltossa. Leijupoltossa jopa 10–50 % polttoainetyypin haihtuvista yhdisteistä hapettuu dityppioksidiksi. N_2O :n muodostuminen riippuu paljolti lämpötilasta. Kun lämpötila tulipesässä on yli 950°C , niin sitä ei enää muodostu¹. Lisäksi typen oksideja syntyy palamisilman typen reagoidessa hapen kanssa korkeassa lämpötilassa. Typen oksidien vapautumista ilmaan pyritään hillitsemään erilaisilla teknisillä menetelmillä tai palamisolosuhteita optimoimalla. Kuorikattilaan voidaan savukaasujen typpipäästöjen minimoimiseksi lisätä ureaa, jonka ansiosta merkittävä osa typen oksideista muuttuu alkuainetyypeksi (N_2) ja vedeksi. Polttamisessa jäljelle jäävä tuhka ei sisällä merkittäviä määriä typpeä. Mikäli kuori toimitetaan sellaiseen hyötykäyttöön, kuoren sisältämä typpi päättyy hyötykäyttökohteeseen ja siten tehtaan ulkopuoliseen typen kiertoon.

Kuorimolta typpeä kulkeutuu hakkeen mukana sellun keittoon. Pääosa tyyppistä kulkeutuu mustalipeän mukana soodakattilaan, jossa se palaa ja vapautuu ilmaan typen oksideina tai alkuainetyypinä. Samoin kuin kuorikattilassa typenoksideja muodostuu lisäksi ilman typen reagoidessa hapen kanssa. Loput tyyppistä kulkeutuu prosessivesien ja kiintoaineksen mukana jätevedenpuhdistamolle.

Ureaa (NH_4CNO), joka sisältää 46 % typpeä, käytetään yleisesti biologisten jätevedenpuhdistamojen lisäravinteena. Ureaa lisätään jäteveden käsittelyssä tehostamaan mikrobien toimintaa ja ravinteiden poistumista, koska ilman lisäystä typen liian pieni määrä rajoittaisi mikrobibiomassan

¹ NO_x -päästöjen vähennystekniikat Suomen biovoimaloissa, Pinja Salhoja, 2017, <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/147804>

kasvua. Jäteveden puhdistamalla typpeä ei voida saostaa kemiallisesti, mutta sen poistoa voidaan tehostaa biologisella nitrifikaatio–denitrifikaatio -menetelmällä. Suurin osa sekä lisäystä typestä että vesien ja kiintoaineksen mukana jätevedenpuhdistamolle saapuvasta typestä sitoutuu biomassaan eli biolietteisiin. Kuitu- ja biolietteiden mukana typpi kulkeutuu joko polttoon, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Mikäli liete poltetaan, typpi vapautuu ilmaan typen oksideina tai alkuainetyypinä. Jos liete kuljetetaan hyötykäyttöön, esimerkiksi maanparannukseen, lietteen sisältämä typpi poistuu sellutehtaan ravinnekierrosta. Lietettä voidaan myös jatkojalostaa esimerkiksi biopelleteiksi, jotka voidaan toimittaa tehtaan ulkopuolella poltettavaksi ja myös silloin typpi poistuu sellutehtaan ravinnekierrosta. Jonkin verran typpeä joutuu puhdistettujen jätevesien mukana vesistöihin.

Paperi- tai kartonkitehtaalalle typpeä kulkeutuu raakavesien muodossa ja poistuu lietteen ja jätevedenpuhdistamolla puhdistettujen vesien mukana. Paperi- tai kartonkitehtaalta sivutuotteisiin päätyvän typen määrä ei kuitenkaan ole yhtä merkittävä kuin sellutehtaalalla.

Vesiympäristössä typpi esiintyy alkuainetyypinä (N_2), ammoniakkinä (NH_3), nitriittinä (NO_2), nitraattina (NO_3), sekä liuenneina orgaanisina yhdisteinä ja orgaanisessa hiukkasaineksessa. Kasvit käyttävät kasvuunsa typen epäorgaanisia muotoja: ammoniakkaa, nitriittiä ja nitraattia.

2.3.2 Fosforin kierto

Fosforia tulee sellutehtaan prosesseihin raaka-ainepuun ja lisätyn fosforihapon muodossa sekä pieniä määriä raakavesien mukana. Puun kuoren fosforipitoisuus on huomattavasti korkeampi kuin kuoritun puun fosforipitoisuus. Merkittävä määrä puun mukana sellutehtaalalle tulleesta fosforista

kulkeutuu siten kuoren mukana joko polttoon kuorikattilaan/voimalaitokseen, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Mikäli kuori poltetaan, kuoren sisältämä fosfori jää jäljelle jääviin lento- ja pohjatuhiin. Tuhkat toimitetaan yleensä hyötykäyttöön maarakennukseen tai lannoitteeksi. Pelloilla ja metsissä sinne toimitettu lannoitefosfori päätty sellutehtaan ulkopuolelle fosforin suureen kiertoon luonnossa ja ihmisen toiminnoissa. Mikäli kuori toimitetaan sellaisenaan hyötykäyttöön, kuoren sisältämä fosfori päätty ao. hyötykäyttökohteeseen ja palautuu lopulta takaisin samaan suureen kiertoon kuten edellä.

Fosforia esiintyy luonnossa pääasiassa ortofosfaattina (PO_4^{3-}) tai niukkaliukoisina kalsium-, alumiini- ja rautafosfaatteina sekä orgaanisina yhdisteinä.

Kuorimolta fosforia kulkeutuu hakkeen mukana sellun keittoon. Osa fosforista kulkeutuu mustalipeän mukana soodakattilaan, josta osa siitä päätty kiintoaineksen mukana viherlipesakkaan ja kaatopaikalle. Osa fosforista kulkeutuu kalkkikierron mukana meesauuniin ja poistuu meesatuhkan/kalkkipölyn mukana. Meesatuhka ja kalkkipöly hyötykäytetään yleensä maanparannuksessa tai lannoitteena, jolloin fosfori siirtyy kiertoon sellutehtaan ulkopuolelle. Muu keitossa erottunut fosfori kulkeutuu prosessivesien ja kiintoaineksen mukana jätevedenpuhdistamolle. Fosforihappoa käytetään silloin tällöin biologisten jätevedenpuhdistamojen lisäravinteena, mutta nykyaikaisessa sellutehtaassa se ei välttämättä ole tarpeen. Fosforia lisätään jäteveden käsittelyssä tehostamaan mikrobien toimintaa ja ravinteiden poistumista, koska ilman lisäystä fosforin liian pieni määrä rajoittaisi biomassan kasvua. Suurin osa lisäystä fosforista ja vesien ja kiintoaineksen mukana jätevedenpuhdistamolle saapuvasta fosforista päätty biolietteisiin.

Lietteiden mukana fosfori kulkeutuu joko polttoon, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Mikäli liete poltetaan, fosfori päätyy tuhkaan ja edelleen hyötykäyttöön (mikäli tuhka toimitetaan uudelleen käyttöön). Jos liete toimitetaan sellaisenaan hyötykäyttöön, lietteen sisältämä fosfori joutuu em. sellutehtaan ulkopuoliseen kiertoon. Jonkin verran fosforia vapautuu puhdistettujen vesien mukana vesistöihin.

Paperi- tai kartonkitehtaalte fosforia kulkeutuu raakavesien muodossa ja poistuu lietteen ja jätevedenpuhdistamolla puhdistettujen vesien mukana. Paperi- tai kartonkitehtaalte sivutuotteisiin päätyvän fosforin määrä ei kuitenkaan ole merkittävä.

2.3.3 Kaliumin kierto

Kaliumia tulee sellutehtaan prosesseihin puuraaka-aineen ja raakavesien mukana. Puun kuoren kaliumpitoisuus on huomattavasti korkeampi kuin kuoritun puun kaliumpitoisuus. Merkittävä määrä puun mukana sellutehtaalte tulleet kaliumista kulkeutuu siten kuoren mukana joko polttoon kuorikattilaan/voimalaitokseen, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Mikäli kuori poltetaan, kuoren sisältämä kalium jää jäljelle jäävään tuhkaan. Tuhka kuljetetaan yleensä hyötykäyttöön maarakennukseen tai lannoitteeksi, jolloin kalium joutuu em. sellutehtaan ulkopuoliseen kiertoon. Mikäli kuori toimitetaan sellaisenaan hyötykäyttöön, kuoren sisältämä kalium päätyy hyötykäyttökohteeseen ja joutuu niin ikään em. sellutehtaan ulkopuoliseen kiertoon.

Kuorimolta kaliumia kulkeutuu hakkeen mukana sellun keittoon. Osa kaliumista kulkeutuu mustalipeän mukana soodakattilaan, josta se päätyy kiintoaineen mukana viherlipeäsaakkaan. Loppu keitossa erottunut kalium kulkeutuu prosessivesien ja kiintoaineen mukana jätevedenpuhdis-

tamolte. Pieni osa vesien ja kiintoaineen mukana jätevedenpuhdistamolte saapuvasta kaliumista saostuu lietteisiin. Lietteiden mukana kalium kulkeutuu joko polttoon, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Lietettä voidaan myös jatkojalostaa esimerkiksi biopelleteiksi. Suurin osa sellutehtaalte kiertävästä kaliumista vapautuu puhdistettujen vesien mukana vesistöihin.

Paperi- tai kartonkitehtaalte kaliumia kulkeutuu raakavesien muodossa ja poistuu lietteen ja jätevedenpuhdistamolla puhdistettujen vesien mukana. Paperi- tai kartonkitehtaalte sivutuotteisiin päätyvän kaliumin määrä ei kuitenkaan ole merkittävä.

2.3.4 Kalsiumin kierto

Kalsiumia tulee sellutehtaan prosesseihin puuraaka-aineen ja ostokalkin muodossa sekä raakavesien mukana. Puun kuoren kalsiumpitoisuus on kuoritun puun kalsiumpitoisuutta huomattavasti korkeampi. Merkittävä määrä puun mukana sellutehtaalte tulleet kalsiumista kulkeutuu siten kuoren mukana joko polttoon kuorikattilaan/voimalaitokseen, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Mikäli kuori poltetaan, kuoren sisältämä kalsium jää jäljelle jäävään tuhkaan. Tuhka kuljetetaan yleensä hyötykäyttöön maarakennukseen tai lannoitteeksi, jolloin kalsium joutuu em. sellutehtaan ulkopuoliseen kiertoon.

Kuorimolta kalsiumia kulkeutuu hakkeen mukana sellun keittoon. Osa kalsiumista kulkeutuu mustalipeän mukana soodakattilaan, josta se päätyy joko kiintoaineen mukana viherlipeäsaakkaan tai kalsiumkarbonaatin kanssa meesaan. Meesa poltetaan meesauunissa, jolloin siitä syntyy poltettua kalkkia. Sellutehtaan kalkkikiertoon lisätään kalsiumia poltetun kalkin (CaO) muodossa. Kalsium kiertää

meesauunin ja kaustisoinnin välillä ja poistuu lopulta prosessista meesatuhkan tai kalkkipölyn muodossa. Meesaa ja meesakalkkia saatetaan myös toimittaa tehtaan ulkopuolelle hyötykäyttöön.

Loppu keitossa erottunut kalsium kulkeutuu prosessivesien ja kiintoaineksen mukana jätevedenpuhdistamolle. Poltettua kalkkia käytetään yleisesti biologisilla jätevedenpuhdistamoilla. Lisätyn kalkin tarkoitus on nostaa jäteveden pH-arvoa lähelle neutraalia ja maksimoida biologisten prosessien tehokkuus. Osa vesien ja kiintoaineksen mukana jätevedenpuhdistamolle saapuvasta kalsiumista saostuu lietteisiin. Lietteiden mukana kalsium kulkeutuu joko polttoon, hyötykäyttöön tai jatkojalostukseen. Lietettä voidaan jatkojalostaa esimerkiksi biopelleteiksi. Osa jätevedenpuhdistamolle saapuvasta kalsiumista vapautuu puhdistettujen vesien mukana vesistöihin.

Paperi- tai kartonkitehtaalle kalsiumia tulee kalkkipitoisten pastojen ja raakavesien muodossa. Pastoja käytetään paperin ja kartongin pinnoitus- ja täyteaineina. Yleisiä kalsiumia runsaasti sisältäviä pastoja ovat muun muassa GCC (ground calcium carbonate) ja PCC (precipitated calcium carbonate). Suurin osa paperitehtaalle kulkeutuvasta kalsiumista poistuu tuotteiden mukana. Osa kalsiumista päätyy kuitenkin esiselkeytyksessä eroteltuun kiintoaineeseen, joka voidaan polttaa tai pyrkiä hyötykäyttämään. Poltossa kuiduilla on lämpöarvoa, mutta pigmenteillä ei, joten mikäli sopivia hyötykäyttötapoja löytyy, niitä kannattaa harkita. Kalsiumia kulkeutuu myös prosessivesien mukana jätevedenpuhdistamolle ja edelleen lietteeseen ja vesistöihin.

2.4 Keskeiset sivuvirrat ja niiden hyötykäyttö

Metsäteollisuudessa syntyy useita sivuvirtoja, joita hyödynnetään erilaisissa hyötykäyttökohteissa, kuten bioenergian tuotannossa, maanparannus-, lannoite- ja –maarakennuskäytössä ja muissa hyötykäyttökohteissa (taulukko 2).

Ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksia tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti. Sivuvirtojen hyödynnettävyyttä voi rajoittaa niiden koostumus tai haitta-ainesisältö. Ravinteiden kierrätyksessä on lisäksi varmistettava, että kierrätysmateriaalien käytön lisääminen on kokonaisuutena ympäristöllisesti kestävä, eikä johda ympäristön kannalta epäedullisiin raaka-ainevirtoihin esimerkiksi pitkien kuljetusmatkojen vuoksi. Ravinteiden alueellinen tarve ja kysyntä eivät välttämättä vastaa tuotantoa. Alueelliset erot lannoitustarpeessa ovat suuria.

2.4.1 Kuori, kuorihiekka, puru ja hake

Kuori on määrältään merkittävin metsäteollisuuden sivuvirta. Kuori sisältää runsaasti biohajoavaa ainesta ja puusta peräisin olevia ravinteita sekä luonnossa puuta suojaavia hartsihappoja ja muita aineita, jotka ovat puun kasvaessa hyönteisille ja jätevesissä vesieliöille myrkyllisiä. Nykyään pääosa metsäteollisuuden prosesseissa syntyvästä kuoresta hyödynnetään energiantuotannossa. Kuoren sisältämät fosfori, kalium ja kalsium siirtyvät poltettaessa tuhkaan, josta ne voidaan palauttaa takaisin kiertoon. Kuoren sisältämä tyyppi vapautuu poltossa ilmakehään. Kuorta voidaan myös toimittaa tehdasalueen ulkopuolelle hyötykäyttöön, esimerkiksi kuorikatteeksi. Kuorikatteella on useita erinomaisia ominaisuuksia. Se parantaa sadeveden imeytymistä kasvien juuriston käyttöön, suojaa maanpintaa kuivu-

miselta ja eroosiolta sekä parantaa hyödyllisten pieneliöiden elinolosuhteita. Kuoren käyttö lannoitteena sen sijaan ei ole yleistä, koska sen biohajoaminen ja ravinteiden vapautuminen on hidasta.

Puraa ja haketta syntyy etenkin mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteena. Suurin osa purusta ja hakkeesta palautetaan metsäteollisuuden prosesseihin esimerkiksi sellun raaka-aineeksi. Osa purusta ja hakkeesta toimitetaan energiantuotantoon.

Kuorihiekka on maa-ainekseen sekoittunutta hienoksi jauhautunutta kuorta, johon kuoren mukana tehtaalle tuleva hiekkaa ja kuorikentän hiekotushiekkaa on sekoittunut vaihtelevia määriä. Se ei sovellu poltettavaksi sen sisältämän epäorgaanisen aineksen suuren määrän takia. Kuorihiekka hyötykäytetään yleensä maarakentamisessa tai maanparannusaineena. Kuorihiekka sisältää jonkin verran ravinteita ja runsaasti epäorgaanista ainesta kuten hiekkaa, hiesua ja savea. Puraa, ylisuurta haketta ja muita puujätteitä syntyy kuorimoilla, mekaanisen metsäteollisuuden prosesseissa ja lajittelussa ja ne toimitetaan yleensä energiahyötykäyttöön.

2.4.2 Tuhkat

Tuhkaa muodostuu, kun poltetaan kuorta, lietettä, rejektiä tai muita hyötykäyttöön kelpaamattomia puujätteitä. Biomateriaalien poltossa syntyy kahdenlaista tuhkaa: pohjatuhkaa ja lentotuhkaa. Pohjatuhka on polttotason alapuolelle (arinan alle kertyvää tai leijukerros poltossa kierrossa ole-

vasta hiekasta erotettua) kertyvää palamatonta ainesta kuten hiekkaa ja polttoaineessa epäpuhtautena olevia pieniä metallikappaleita, josta käytetään myös nimitystä pohjatuhka ja kuona. Lentotuhka taas on hienorakeista savukaasujen mukana kattilasta poistuvaa ja kuivana pölyävää savukaasuista yli 95 prosenttisesti erotettua kiintoainesta. Pohja- ja lentotuhkan ominaisuudet eroavat huomattavasti toisistaan. Ne voidaan helposti pitää teknisesti erillään ja hyödyntää omina jätejakeinaan ja niillä on myös erilaisia hyötykäyttömahdollisuuksia. Puuperäinen lento- ja pohjatuhka soveltuvat yleensä molemmat lannoite- ja maarakennuskäyttöön. Leijukerroskattiloiden pohjatuhka ei yleensä sovellu levitettäväksi metsään sen petimateriaalin suuren hiekkapitoisuuden takia. Arinakattilan pohjatuhka taas soveltuu lannoitteeksi paremmin, mikäli se on hyvin palanut. Arinakattilan pohjatuhka sisältää myös lentotuhkaa vähemmän raskasmetalleja. Myös polttoaineen koostumus, poltoteknikka ja tuhkan keräystapa vaikuttavat kattilassa muodostuvan ja siitä poistettavan tuhkan liukoisuus- ja muihin ominaisuuksiin. Puusta polttamalla saatu tuhkka eli puutuhka sisältää tyyppä lukuun ottamatta kaikkia ravinteita, joita kasvit tarvitsevat.²

Metsäteollisuuden tuhkat soveltuvat yleensä sekä pelto- että metsälannoitteiksi ja ne ovat hyvä fosforin ja kaliumin lähde. Koska fosfori liukenee tavallisesti kuorituhkasta hyvin hitaasti (tyypillisesti yli 10 vuoden aikana), se soveltuu paremmin metsien lannoitukseen, jossa lannoitusväli on 15–20 vuotta. Peltojen lannoitus tehdään 1–3 vuoden välein, ja siihen kuoren ja puun polton tuhkat sopivat sekoitet-

² Arnkil, N., Joensuu, S., Kauppila, M., Kontinen, K., Kotiharju, A., Lahti, E. & Tenhola, T. 2020. Tuhka osana kestäväää liiketoimintaa – Opas tuhkan tuottajille ja käyttäjille. Tapion raportteja 42. Tapio Oy.

tuna nopealiukoisen kemiallisesti valmistetun fosforilannoitteen (jolloin se toimii fosforilannoitteen pitkävaikutteisena komponenttina). Polttoaineesta peräisin olevat raskasmetallit kuten elohopea, nikkeli ja kadmium päätyvät kuori- ja puutuhkaan sekä kuitu- ja biolietteen polton tuhkaan, ja ne voivat rajoittaa tuhkan käyttöä kierrätyslannoitteena. Tuhkan käyttöä lannoitevalmisteenä voi rajoittaa myös sen hankala käsiteltävyys, jota voidaan parantaa stabiloinnilla, rakeistuksella tai pelletöinnillä.

Lentotuhkaa voidaan myös hyödyntää vähähiilisen betonin valmistuksessa. Aineistona käytetyssä tehdasympäristökohtaisissa ravinnetaseissa pohja- ja lentotuhka oli ilmoitettu yhdessä.

2.4.3 Kalkkijakeet

Meesaa syntyy kaustisoinnin sivutuotteena, ja se sisältää pääasiassa kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Meesa poltetaan meesauunissa, jossa se muuttuu kalsiumoksidiksi (CaO), eli poltetuksi kalkiksi, ns. meesakalkiksi. Meesakalkia käytetään prosessissa rinnakkain ostokalkin kanssa ja sitä voidaan hyötykäyttää paitsi kalkitusaineena maatalousmailla myös maanparannuskalkkina. Meesakalkki sisältää erityisesti kalsiumia, mutta myös pieniä määriä kaliumia ja fosforia. Meesauunissa syntyy sivuvirtana meesatuhkaa eli kalkkipölyä, jotka voidaan sekoittaa meesakalkkiin tai hyötykäyttää prosessin ulkopuolella. Meesakalkkiin kertyy myös jonkin verran haitta-aineita, mutta pitoisuudet ovat yleensä pieniä. Niitä voidaankin usein hyötykäyttää pelto-annoituksessa ja kalkitusaineena.

2.4.4 Viherlipeäsakka

Viherlipeäsakka (toiselta nimeltään soodasakka) on sellun valmistuksessa soodakattilassa syntyvää kiinteää ainesta.

Viherlipeäsakka sisältää puusta peräisin olevia alkalimetal-leja, raskasmetalleja ja jonkin verran keittoliipeää. Ravin-teista viherlipeäsakka sisältää lähinnä kalsiumia. Viherli-peäsakalle ei ole yleistä hyötykäyttökohdetta ja tällä het-kellä se useimmiten loppusijoitetaan kaatopaikalle. Vi-herlipeäsakan hyötykäyttöä hankaloittaa sen koostumus, emäksisyys ja raskasmetallit. Viherlipeäsakkaa on jonkin verran käytetty maarakentamisessa, ja sen soveltuvuutta voimalaitosten savukaasujen puhdistuksessa on pilotoitu. Viherlipeäsakan soveltuvuutta betonia korvaavan raken-nusmateriaalin ja keinokivien valmistukseen on myös tut-kittu.

2.4.5 Lietteet

Sellu- ja paperitehtaalla voi syntyä muun muassa primääri-lietettä eli esiselkeytyksessä erottuvaa kuitulietettä, bio-lietettä, pastalietettä ja kuitusavea. Lietteet sisältävät vaih-televan määrän biohajoavaa ainesta, yleensä noin 50–80 % kuiva-aineesta. Primääri- eli kuitulietettä syntyy esisel-keytyksessä ja se sisältää yleensä rejektejä, kuituja ja muuta selkeytyksessä erottuvaa kiintoainesta (hiekkaa, sa-vea jne.). Lietteen sisältämä kuitu on prosessista poistetta-vaa tai häviönä poistuvaa materiaalia ja kemialliselta koos-tumukseltaan pääasiassa selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Kuituaines sisältää kalsiumia ja erittäin vähän muita ravinteita. Bioliete syntyy biologisella jätevedenpuh-distamalla liuenneen orgaanisen aineksen muuttuessa mik-robien ja sienien biomassaksi. Aktiivilieteprosessissa esi-selkeytyksestä biologiseen vaiheeseen siirtyvään jäteve-teen lisätään usein ravinteita tai kalkkia (pH:n säätöön) te-hostamaan mikrobien kasvua, koska biologiseen puhdis-tukseen tulevassa jätevedessä oleva liian pieni määrä typ-peä (ja joskus myös fosforia) rajoittaa aktiivilieteprosessin

mikrobien kasvua. Bioliete erotetaan jätevedestä jälkiselkeytyksessä, ja bioliete ja kuituliete sekoitetaan ennen lietteen pumppaamista lietteen käsittelyyn. Pastalietettä syntyy paperitehtaalla ja se sisältää paperin ja kartongin päällystyksessä käytettävää pastaa ja kuituja. Pastan kalsiumpitoisuus riippuu sen pigmentin tyypistä ja kemiallisesta koostumuksesta. Kuitusavi eli siistausliete syntyy nimensä mukaisesti siistauksen aikana, kun kierrätysmassasta poistetaan epäpuhtauksia kuten painoväriä ja täyte- ja päällystysaineita.

Suuri osa metsäteollisuudessa syntyvistä lietteistä hyötykäytetään energiantuotannossa. Kuitulietettä voidaan käyttää myös maanparannusaineena ja kateaineena, mikä voi edellyttää lietteen jatkokäsittelyä esimerkiksi kompostoinnilla tai mädättämällä sen ominaisuuksien parantamiseksi ja riittävän hygieniatason saavuttamiseksi. Mädätettyä biolietettä voidaan edelleen jatkojalostaa biopelleteiksi. Kompostoitua biolietettä voidaan sekoittaa kuitulietteeseen ja käyttää kaatopaikkarakentamisessa.

Taulukko 2. Metsäteollisuudessa syntyvien sivuvirtojen yleiset hyötykäyttökohteet ja ravinnepitoisuudet painoprosenttina kuiva-aineesta. Hyötykäyttöprosentit on johdettu metsäteollisuus ry:n toimittamista tilastoista.

Metsäteollisuuden toimiala	Sivuvirta	Määrä 2019	Yleisimmät hyötykäyttökohteet	N %	P %	K %	Ca %
Koko metsäteollisuus	Kuori ^{1,2}	7,9 milj. m ³ (määrä sisältää vain energiantuotantoon toimitetun kuoren)	Energiahyötykäyttö Muu hyötykäyttö	0,4–0,5	0,05–0,06	0,2–0,3	0,6–0,8
	Kuorihiekka ³	-	Maarakentaminen Maanparantaminen	-	0,04	0,1	0,6
	Puru ja hake ^{1,2}	13,3 milj. m ³	Materiaalihyötykäyttö (noin 70 %) Energiahyötykäyttö (noin 30 %)	0,06–0,08	0,006–0,01	0,02–0,04	0,06–0,07
	Puutuhka ⁴	151 106 t	Maarakentaminen (noin 70 %) Lannoitekäyttö (noin 20 %)	-	1,5	3,8	23,3
	Jätevedenpuhdistamon liete (bioliete) ⁵	389 245 t	Energiahyötykäyttö (noin 80 %) Maarakentaminen (noin 10 %)	0,6	0,1	0,1	-
	Kuitu- ja pastaliete ^{3,5}	71 110 t	Maarakentaminen (noin 45 %) Energiahyötykäyttö (noin 30 %)	1,2–1,7	0,2–0,3	0,1–0,2	9,1
Selluteollisuus	Viherlipeäsakka ⁵	80 765 t	Loppusijoitus (noin 65 %) Maarakentaminen ja muu hyötykäyttö (noin 20 %.)	-	0,1	0,4	21,5
	Meesa ⁵	60 355 t	Lannoitekäyttö (noin 50 %) Muu hyötykäyttö (noin 40 %)	-	0,3	0,1	36,3
	Meesatuhka/ kalkkipöly ³	-	Maanparantaminen Lannoitekäyttö	-	1,2	-	37,0
Paperi- ja kartonkiteollisuus	Kuitu/nollakuitu ³	-	Energiahyötykäyttö Maanparantaminen	0,03	0,01	0,02	9,6
	Kuitusavi ³	Noin 100 000 t ⁶	Energiahyötykäyttö Maanparantaminen	0,2	-	-	10

¹Antikainen et al. 2004, Flows of nitrogen and phosphorus in Finland – the forest industry and use of wood fuels. ²Alakangas et al. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. ³Esimerkkitehtaiden ilmoittamat ravinnepitoisuudet. ⁴Arnkil, N. et al. 2020. Tuhka osana kestävää liiketoimintaa – Opas tuhkan tuottajille ja käyttäjille. ⁵Apila Group 2013, Metsäteollisuuden ravinteet – Metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntämien lannoitevalmisteina. ⁶Finncao Oy 2001, Finnca-y-kuitusavet pintarakenteiden tiivistekerroksissa. Taulukko on koostettu Olli Lehtovaaran opinnäytetyön taulukon 7 pohjalta (Lehtovaara, O. 2017. Metsäteollisuuden sivuvirroista valmistettavien lannoitetuotteiden markkinat).

3 Aineisto, menetelmät ja rajaukset

3.1 Suomen metsäteollisuuden laskelmat

Tässä selvityksessä tarkasteltiin koko Suomen metsäteollisuuden tehdasprosesseissa kiertäviä ravinteita, ravinnepitoisia sivuvirtoja, yleisimpiä käytäntöjä ja hyötykäyttökohteita.

Tasetarkastelussa käytettiin Metsäteollisuus ry:n toimittamia lähtötietoja koko Suomen metsäteollisuuden puunkäytöstä, sivuvirroista, niiden hyötykäyttökohteista ja päästöistä. Tarkastelussa käytettiin vuoden 2019 lukuja, koska poikkeuksellisen vuoden 2020 ei uskottu edustavan luotettavasti Suomen metsäteollisuuden normaalitilannetta. Kaikissa taselaskelmissa käytettiin yksikkönä kuivatonna tai kuivakilotonnia. Metsäteollisuuden puuraaka-aineen määrä muunnettiin märkäkuutioista kuivatonneiksi hyödyntämällä tässä työssä mukana olevan esimerkkitehtaan toimittamia muuntokertoimia. Puuraaka-aineen, kuoren, purun ja hakkeen kuiva-ainepitoisuudeksi oletettiin 40 % tehtaiden ilmoittamien kuiva-ainepitoisuuksien perusteella.

Metsäteollisuus ry:n toimittamissa lähtötiedoissa oli tarkasteltu viittä eri ravinnepitoista sivuvirtaa, jotka olivat meesa, viherlipeäsakka, kuitu- ja pastaliete, jätevedenpuhdistamon liete ja tuhka. Kuori, puru ja hake päätettiin myös sisällyttää tarkasteluun niiden suuren volyymin ja sisältämien ravinteiden takia. Kuoren määränä työssä käytettiin vuonna 2019 energiantuotantoon toimitetun kuoren määrää, 7,9 milj. m³.

Tehdaskohtaisten esimerkkien perusteella kuorta toimitetaan pieniä määriä myös muualle hyötykäyttöön – tästä ei kuitenkaan ollut saatavilla koko Suomen kattavaa tilastotietoa. Suomen metsäteollisuuden tyypitaseessa huomioitiin lisäksi jätevedenpuhdistamojen käyttämän urean sisältämä tyyppi. Jätevedenpuhdistamojen kokonaisurean määrää ei ollut tiedossa, joten laskelmissa käytettiin Antikaisen et al. (2004)¹ tutkimuksessa tehtyä arviota (6,3 kt ureaa, jossa 2,9 kt tyyppiä). Kuitulevyjen valmistuksessa käytettävää ureaa ei sisällytetty ravinnetaselaskelmaan, koska sen arvioitiin päätyvän kokonaisuudessaan valmiisiin tuotteisiin. Koko Suomen metsäteollisuuden käyttämän ostokalkin ja pastan tarkkaa määrää ei ollut saatavilla.

Taselaskennassa käytettiin ensisijaisesti keskimääräisiä kotimaisista kirjallisuuslähteistä löytyviä ravinnepitoisuuksia. Joidenkin sivuvirtojen ravinnepitoisuuksina käytettiin perustellusti tehdaskohtaisessa tarkastelussa kerättyjä tehdaskohtaisia pitoisuuksia koko Suomen laajuisten ajantasaisten lähtötietojen ollessa puutteellisia.

Puun sisältämä ravinteiden määrä vaihtelee suuresti puulajien, kasvupaikkojen ja puun eri osien välillä. Puuraaka-aineen ja kuoren ravinnepitoisuuksien laskennassa käytettiin keskimääräisiä kirjallisuusarvoja. Typen ja fosforin pitoisuuksien laskennassa käytettiin Antikaisen et al. (2004)³ tutkimuksessa esitettyjä eri puulajien keskimääräisiä ravinnepitoisuuksia. Kaliumin ja kalsiumin pitoisuuksien laskennassa käytettiin VTT:n selvityksessä⁴ Suomessa käytettävistä polttoaineiden ominaisuuksista esitettyjä ravinnepitoisuuksia.

³ Antikainen, R. Haapanen, R. & Rekolainen, S. 2004. Flows of nitrogen and phosphorus in Finland—the forest industry and use of wood fuels. Journal of Cleaner Production 12 (2004) 922.

⁴ Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J., 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 928.

suuksia (2016). Laskelmissa käytetyt puun ja kuoren ravinnepitoisuudet on esitetty taulukossa 3. Muiden sivuvirtojen ravinnepitoisuuksina käytettiin taulukossa 2 esitettyjä ravinnepitoisuuksia.

Taulukko 3. Ravinnetaselaskelmissa käytetyt eri puulajien ravinnepitoisuudet kuivapainolle kuori ja tukkipuu eriteltynä (N ja P: Antikainen et al. (2004), K ja Ca: VTT Technology 258, 2016).

Puulaji	Kuori				Tukkipuu			
	N-%	P-%	K-%	Ca-%	N-%	P-%	K-%	Ca-%
Mänty	0,40	0,06	0,318	0,635	0,06	0,0055	0,0407	0,0641
Kuusi	0,48	0,055	0,203	0,835	0,08	0,01	0,0215	0,0724
Lehti- puu	0,47	0,05	0,171	0,786	0,08	0,01	0,0315	0,0636

3.2 Tehdasympäristökohtaiset laskelmat

Selvityksessä tarkasteltiin neljän erilaisen tehdasympäristön ravinnetaseita. Tehdasesimerkit edustavat eri kokoisia ja eri ikäisiä tehdasympäristöjä, sellu- ja paperi- tai kartonkitehdasta yhdessä ja erikseen. Tarkasteluun valittiin Stora Enson Imatran tehtaas, MetsäFibren Äänekosken tehtaas, UPM:n Jämsänkosken paperitehdas ja UPM:n Kaukaan tehtaas. Jokaiselle tehdasympäristölle laskettiin erikseen ravinnetaseet fosforin, typen, kalsiumin ja kaliumin osalta tehtaiden yhteyshenkilöiden toimittamien lähtötietojen perusteella. Tehdasympäristökohtaisen tarkastelun tavoitteena oli havainnollistaa ravinteiden kiertoa ja prosesseissa syntyviä sivuvirtoja erilaisissa tehtaissa sekä tunnistaa edelleen tutkittavia ja kehitettäviä osa-alueita.

Taselaskenta tehtiin yhteistyössä tehtaiden yhteyshenkilöiden kanssa. Jokaisen tehtaan osalta laskettiin ensimmäiseksi ravinnekierron kannalta oleelliset prosessit ja virrat sisältävä massatase. Massataseilla pyrittiin määrittämään tehtaiden ravinteita sisältävät materiaaliavirrat ja tunnistamaan taselaskennan epävarmuustekijöitä. Massataseiden perusteella laskettiin jokaiselle tehtaalle ravinnetaseet. Ravinnetaselaskelmissa käytettiin ensisijaisesti tehtaiden ilmoittamia ravinnepitoisuuksia. Mikäli jonkin materiaalin tai sivuvirran tehdaskohtaisia ravinnepitoisuuksia ei ollut saatavilla, käytettiin laskelmissa joko kirjallisuudesta löytyviä ravinnepitoisuuksia tai perustellusti jonkin toisen tarkastelussa mukana olevan tehtaan ilmoittamia ravinnepitoisuuksia.

Laskennassa käytettiin aina sellaisen vuoden (2018–2020) lähtötietoja, jonka tehtaan yhteyshenkilö koki edustavimmaksi ravinnetaseen kannalta.

Ravinnetaseet on esitetty ravinne- ja tehdaskohtaisina kuvaajina. Ravinnetaseissa ei ole esitetty absoluuttisia lukuja, vaan prosessissa virtaavien ravinteiden määrät on esitetty prosentteina kokonaisravinnemäärästä. Taseisiin on merkitty prosenteilla eri ravinnelähteiden, hyötykäyttökohteiden ja päästöjen osuus prosessiin sisään ja ulos virtaavista ravinteista. Tasekuvaajien nuolien paksuus on suhteutettu virtaavien ravinteiden määrään. Mustat nuolet kuvastavat materiaaliavirtoja, jotka eivät sisällä tarkasteltua ravinnettä. Sivuvirtojen ravinnepitoisuuksia on tarkemmin avattu luvussa 2.3.

3.3 Epävarmuustekijät

Ravinnetaselaskennassa on useita epävarmuustekijöitä. Metsäteollisuuden ravinnekiertoon sisään tulevien ravinteiden määrää riippuu raaka-ainepuun määrästä. Koska puun määrä on ilmoitettu märkäkuutiaina, puun määrä piti muuntaa kuivatonneiksi laskelmia varten. Muuntamisessa käytetty menetelmä ja oletettu kuiva-ainepitoisuus vaikuttavat merkittävästi ravinnekiertoon tulevien ravinteiden laskennalliseen määrään. Laskelmissa käytettiin tässä työssä mukana olevan esimerkkitehtaan toimittamia lähtötietoja. Puun tiheydestä ja kuiva-ainepitoisuudesta on kuitenkin vaihtelevaa tietoa, ja esimerkiksi Antikaisen et al. (2004) tutkimuksessa oli käytetty eri muuntokertoimia kuin mitä tässä selvityksessä käytettiin. Puun mukana tulevien typen ja fosforin määrät täsmäsivät kuitenkin Antikaisen et al. tutkimuksen tuloksiin, joten tehtaan toimittamien muuntokertoimien ja kuiva-ainepitoisuuden voidaan olettaa olevan laskentaan soveltuvia.

Kuori on volyymiltään merkittävin ravinnepitoinen sivuvirta, mistä syystä kuoren määrän laskennassa käytetty menetelmä vaikuttaa merkittävästi ravinnetaseisiin. Myös kuoren määrästä on saatavilla vaihtelevaa tietoa. Esimerkiksi Antikaisen et al. (2004) tutkimuksessa kuoren osuudeksi oli oletettu puulajista riippuen 12–14 %, kun tämän selvityksen laskelmissa oli käytetty vastaavasti 9–12 %. Antikaisen et al. tutkimuksessa kuitenkin arvioitiin, että noin 20 % kuoresta poistuu hukkana ja noin 20 % kuoresta on todellisuudessa puuta. Koko Suomen kuoren määränä käytettiin vuonna 2019 energiantuotantoon toimitettua kuoren määrää, 7,6 milj. m³. Tietoa ei kuitenkaan ollut saatavilla sen kuoren määrästä, joka toimitettiin muuhun hyötykäyttöön. Kuoren muun hyötykäytön arvioitiin tehdaskohtaisten taseiden perusteella olevan kuitenkin melko vähäistä.

Raaka-ainepuun ravinnepitoisuudet voivat vaihdella suuresti kasvupaikan mukaan. Laskennassa käytettiin keskimääräisiä kirjallisuudesta löytyviä arvoja. Koska puu on typen, fosforin ja kaliumin osalta merkittävin ravinnelähde metsäteollisuuden prosesseissa, puuraaka-aineen ravinnepitoisuuksilla on hyvin suuri vaikutus taselaskelmiin. Myös laskelmissa käytetty puun kuiva-ainepitoisuus (40 %) voi vaihdella suuresti puulajien ja kasvupaikkojen mukaan.

Sivumateriaalivirtoja kuten tuhkia tarkastellaan usein yhtenä homogeenisenä ryhmänä, vaikka todellisuudessa materiaalivirtojen välillä on suuria eroja. Ne ovat useiden tuottajien erilaisista raaka-aineista erilaisissa prosesseissa tuottama joukko erilaatuisia sivumateriaaleja. Esimerkiksi tuhkan laatuun vaikuttavat poltettava raaka-aine, mistä osasta kattilaa tuhka on kerätty (lento- vai pohjatuhka) sekä polttoprosessi. Tuhkan laatu myös vaihtelee samalla laitoksella. Ravinnetaselaskelmien lähtötiedoissa ei ollut esimerkiksi eroteltu lento- ja pohjatuhkaa, joiden ominaisuudet ja hyötykäyttökohteet eroavat toisistaan.

Tehdaskohtaisten laskelmien yhtenä epävarmuustekijänä oli puutteelliset tehdasympäristökohtaiset lähtötiedot. Erityisesti kaliumin ja kalsiumin osalta joidenkin sivuvirtojen ravinnepitoisuuksia ei ollut määritetty kaikissa tehtaissa. Mikäli tehdaskohtaisia pitoisuuksia ei ollut saatavilla, laskelmissa käytettiin perustellusti joko kirjallisuudesta löytyviä tai toisen työssä käytetyn esimerkkitehtaan ilmoittamia pitoisuuksia. Kirjallisuudessa mainitut ja muiden työssä käytettyjen esimerkkitehtaiden ilmoittamat pitoisuudet voivat kuitenkin erota merkittävästi todellisista pitoisuuksista ja vääristää siten tasetta. Raakavesien sisältämien ravinteiden määrät jouduttiin usein arvioimaan puutteellisten lähtötietojen takia.

Koska tässä selvityksessä tarkasteltiin metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnetasetta, tarkastelun ulkopuolelle rajattiin ravinteiden ja eri yhdisteiden kierrot metsäteollisuuden prosessien ulkopuolella. Näihin lukeutuu muun muassa ravinteiden kierto metsissä, vesistöissä ja sivuvirtojen hyötykäyttökohteissa.

4 Ravinnetaseet

4.1 Suomen metsäteollisuuden ravinnetaseet

Koko Suomen metsäteollisuuden tehdasprosesseille laskettiin ravinnetaseet Metsäteollisuus ry:ltä saatujen lähtötietojen perusteella typen, fosforin, kaliumin ja kalsiumin osalta. Ravinnetaselaskelmat sisältävät metsäteollisuuteen puuraaka-aineen mukana tulevat ravinteet, muut merkittävät lisätyt ravinteet, teollisuuden prosesseissa kiertävät ravinteet, ravinnepäästöt vesiin ja ilmaan sekä syntyvien sivuvirtojen sisältämät ravinteet.

Pääosa metsäteollisuuteen tulevista ravinteista on peräisin puusta. Suuri osa puun sisältämistä ravinteista on sen kuorella. Kuori suurelta osin samoin kuin osa lietteistä päätyy energiantuotantoon, jolloin niiden sisältämä fosfori, kalium ja kalsium rikastuvat tuhkaan ja typpi päätyy ilmaan. Osa purusta ja hakkeesta palautuu takaisin metsäteollisuuden prosesseihin, jossa niitä hyödynnetään muun muassa sellun valmistuksessa.

Pääosa tuhkasta ja osa muista sivumateriaaleista päätyy maarakentamiseen, jossa materiaalit korvaavat neitseellisiä mineraaliaineita. Tällöin tuhkan ravinteet eivät kuitenkaan päädy takaisin hallittuun ravinteiden kiertoon, jossa ne voisivat korvata neitseellisiä fosforilannoitteita. Osa tuhkasta

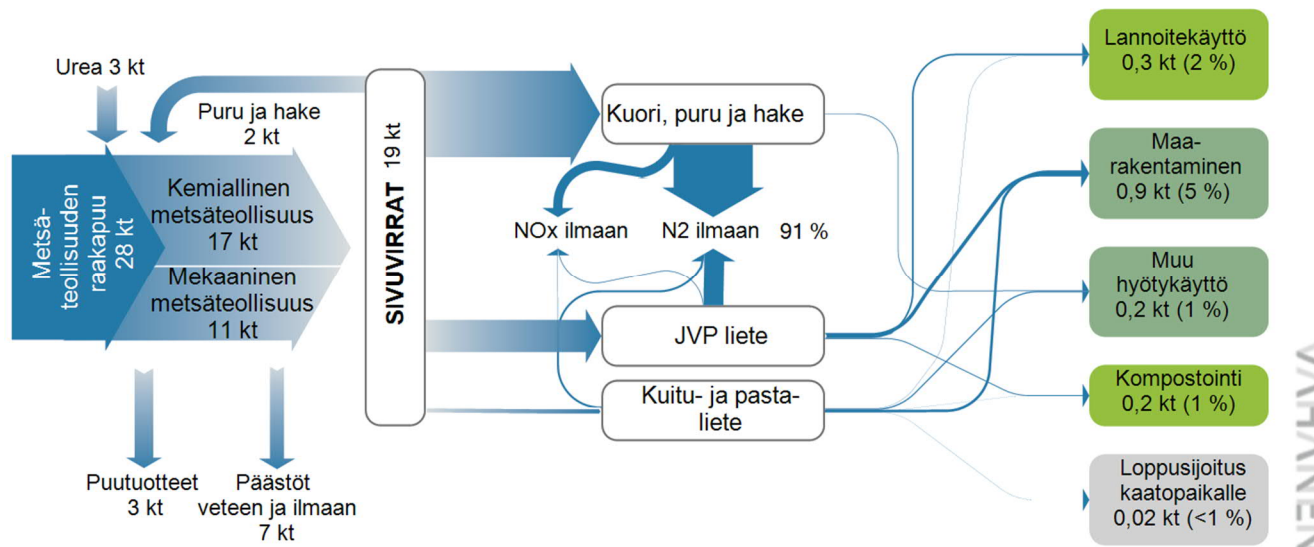
ja lietteistä päätyy lannoitekäyttöön, pieni osa kompostoituihin. Ravinteet voivat päätyä ravinnekiertoon myös muiden hyötykäyttökohteiden kautta. Tilastoitu muu hyötykäyttö pitää sisällään muun muassa hyödyntämisen maanparannusaineena. Määristä ei kuitenkaan ollut tarkempaa tietoa käytettävissä.

Pieni osa ravinteista, etenkin kalsiumista, päätyy hyötykäytön sijasta loppusijoitukseen kaatopaikalle lähinnä viherlipeäkan mukana.

4.1.1 Tyypitase

Metsäteollisuuteen tulee puuraaka-aineen mukana noin 28 kt typpeä, josta noin puolet on puun kuoressa (kuva 4). Metsäteollisuuteen tulee typpeä myös jätevedenpuhdistamoille lisätyn urean muodossa. Typpeä sisältäviä sivuvirtoja ovat kuori, puru ja hake sekä lietteet. Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän typen osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaistypen määrästä. Suurin osa (91 %) sivuvirtojen sisältämästä tyypestä päätyy energiantuotantoon. Energiantuotantoon toimitetaan suurin osa kuoresta ja osa purusta, hakkeesta ja lietteistä. Energiantuotannossa sivu-

virtoihin sitoutunut tyyppi vapautuu ilmaan joko alkuainetypenä (N_2) tai typen oksideina (NO_x). Tyyppiä päätyy jonkin verran jätevedenpuhdistamon lietteen ja kuitu- ja pastalietteen mukana myös muualle hyötykäyttöön. Osa sivumateriaalien sisältämästä tyypestä (5 %) päätyy maarakentamiseen, jolloin tyyppi ei päädy hallittuun ravinnekiertoon. Sivuvirtojen tyypestä päätyy vähäisiä määriä myös lannoitekäyttöön (2 %), kompostointiin (1 %) ja muuhun hyötykäyttöön (1 %), josta osa on maanparannuskäyttöä. Valtaosa metsäteollisuudessa kiertävästä tyypestä ei palaudu hallittuun ravinnekiertoon. Tyyppi ei kuitenkaan ole uusiutumaton ravinne, eikä sen kierrätys ole yhtä merkityksellistä kuin esimerkiksi fosforin kierrätys.

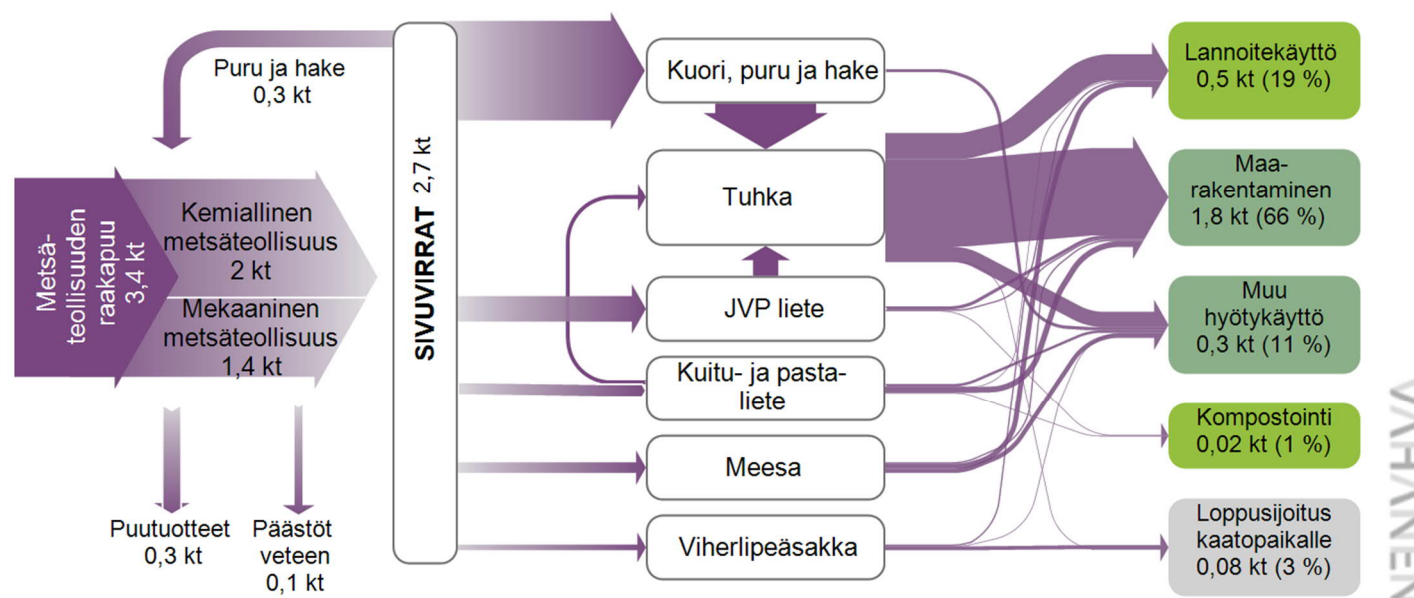


Kuva 4. Suomen metsäteollisuuden vuoden 2019 tyypitase. Nuolien paksuus kuvastaa sivuvirtojen sisältämän typen määrää. Kokonaistypen määrä on ilmoitettu kilotonneina (kt). Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän typen osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaistypen määrästä (19 kt).

4.1.2 Fosforitase

Metsäteollisuuteen tulee puuraaka-aineen mukana noin 3,4 kt fosforia, josta noin puolet on puun kuoressa (kuva 5). Sivuvirroista tuhka sisältää merkittävästi eniten fosforia. Tuhkaa muodostuu, kun puuperäisiä sivuvirtoja kuten kuorta, purua, haketta ja lietteitä poltetaan energiantuotannossa. Tuhka onkin metsäteollisuuden merkittävin fosforipitoinen sivuvirta. Myös viherlipesakka ja meesa sisältävät jonkin verran fosforia. Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän fosforin

osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaisfosforin määrästä. Suurin osa fosforipitoisista sivuvirroista (66 %) hyödynnetään maarakentamisessa, jolloin fosfori ei päädy hyötykäyttöön ravinteena. Fosforista 19 % päätyy lannoitekäyttöön. Fosforia päättyy 11 % muuhun hyötykäyttöön, josta osa on maanparannuskäyttöä. Pieni osa (1 %) fosforista päättyy kompostointiin.

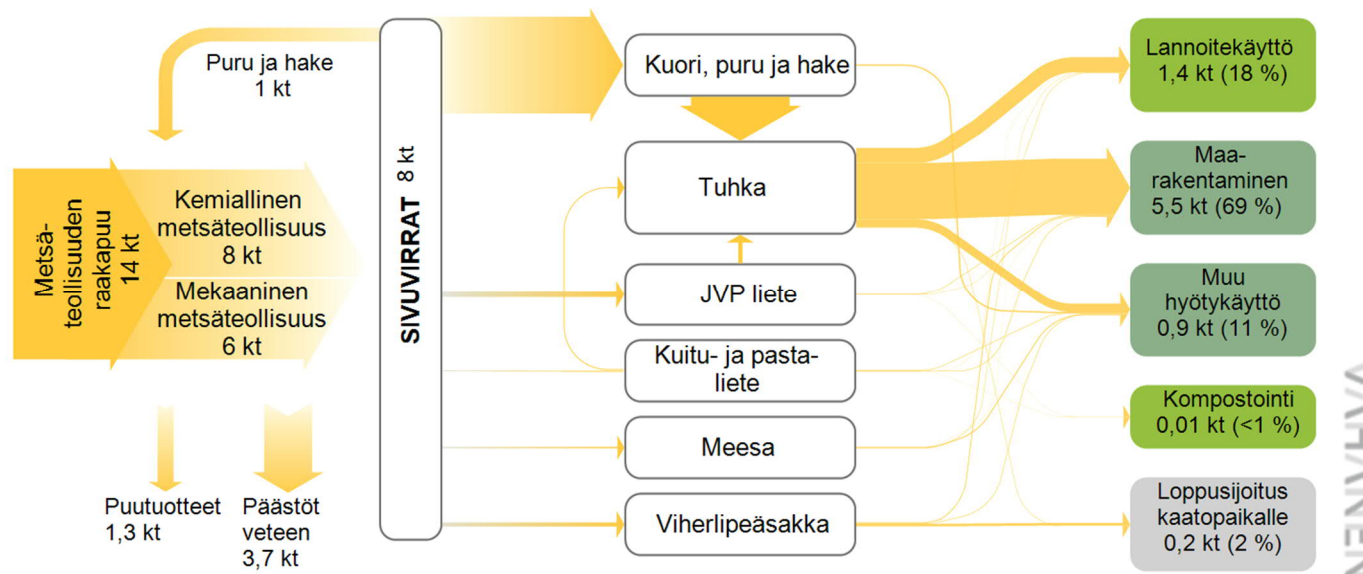


Kuva 5. Suomen metsäteollisuuden vuoden 2019 fosforitase. Nuolien paksuus kuvastaa sivuvirtojen sisältämän fosforin määrää. Kokonaisfosforin määrä on ilmoitettu kilotonneina (kt). Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän fosforin osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaisfosforin määrästä (2,7 kt).

4.1.3 Kaliumtase

Metsäteollisuuteen tulee puuraaka-aineen mukana noin 14 kt kaliumia, josta noin puolet on puun kuoressa (kuva 6). Suurin osa kaliumpitoisista sivuvirroista kuten kuoresta, purusta, hakkeesta ja lietteistä päätyy energiantuotantoon ja edelleen tuhkaan, joka on metsäteollisuuden merkittävin kaliumpitoinen sivuvirta. Suurin osa tuhkasta hyödynnetään maarakentamisessa, mutta sitä toimitetaan myös lannoitekäyttöön ja muuhun hyötykäyttöön. Myös viherlipesakka ja meesa sisältävät kaliumia. Meesasta suurin osa hyödynnetään maanparannusaineena ja viherlipesakasta lopputuotteita kaatopaikoille.

Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän kaliumin osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaiskaliumin määrästä. Kaliumista 18 % päätyy lannoitekäyttöön. 11 % kaliumista päätyy muuhun hyötykäyttöön, josta osa on maanparannuskäyttöä. Pieni osa < 1 % fosforista päätyy kompostointiin. Vesistöihin päätyvän kaliumin määrä on arvioitu puun mukana sivuvirtojen yli jäävän kaliumin määrän perusteella.

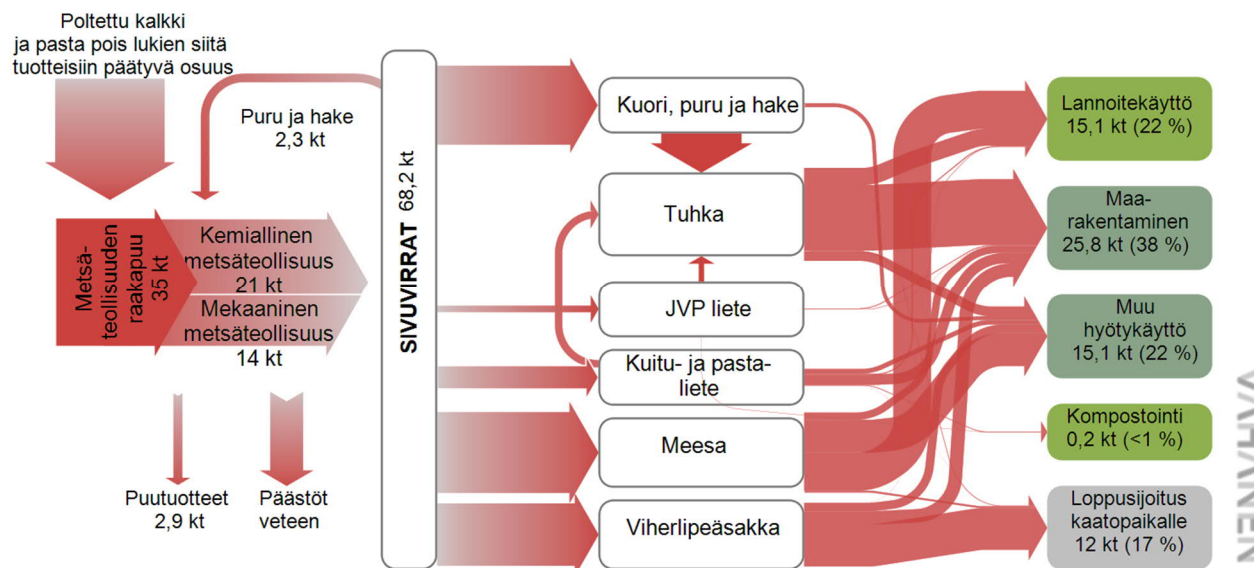


Kuva 6. Suomen metsäteollisuuden vuoden 2019 kaliumtase. Nuolien paksuus kuvastaa sivuvirtojen sisältämän kaliumin määrää. Kokonaiskaliumin määrä on ilmoitettu kilotonneina (kt). Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän kaliumin osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaiskaliumin määrästä (8 kt).

4.1.4 Kalsiumtase

Metsäteollisuuteen tulee puuraaka-aineen mukana noin 35 kt kalsiumia, josta yli puolet on puun kuoressa (kuva 7). Metsäteollisuuteen tulee kalsiumia myös sellutehtaille ja jätevedenpuhdistamoille lisätyn poltetun kalkin sekä paperi- ja kartonkitehtaille lisätyn kalsiumpitoisten pastojen muodossa. Taseessa on huomioitu ainoastaan lietteisiin päätyvä ylimääräinen pasta, sillä suurin osa pastasta poistuu paperi- ja kartonkituotteiden mukana. Edellä mainituista kalsiumlähteistä ei ollut saatavilla määrällistä tietoa.

Kalsiumia esiintyy tässä selvityksessä tarkastelluista ravinteista kaikista runsainten metsäteollisuuden sivuvirroissa. Noin kolmasosa sivuvirtojen sisältämästä kalsiumista päätyy energiantuotantoon ja edelleen tuhkaan. Merkittävimpiä kalsiumpitoisia sivuvirtoja ovat tuhka, meesa ja viherlipeäsakka. Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän kalsiumin osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaiskalsiumin määrästä. Noin 38 % kalsiumpitoisista sivuvirroista hyödynnetään maarakentamisessa. Noin 22 % kalsiumista, lähinnä tuhkaa ja meesaa, päätyy lannoitekäyttöön. Muuhun hyötykäyttöön päätyy 22 % kalsiumista, josta osa on maanparannuskäyttöä. Kalsiumista 17 % päätyy loppusijoitukseen kaatopaikalle viherlipeäsakan muodossa.



Kuva 7. Suomen metsäteollisuuden vuoden 2019 kalsiumtase. Nuolien paksuus kuvastaa sivuvirtojen sisältämän kalsiumin määrää. Kokonaiskalsiumin määrä on ilmoitettu kilotonneina (kt). Eri hyötykäyttökohteisiin päätyvän kalsiumin osuus (%) on laskettu sivuvirtojen sisältämästä kokonaiskalsiumin määrästä (68,2 kt).

4.2 Tehdasympäristökohtaiset ravinnetaseet

Ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta tehtaiden välillä on havaittavissa eroja ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta. Suurimpia eroja tehdasympäristökohtaisissa tarkasteluissa oli nähtävissä sivuvirtojen käsittelyssä, laitekoonpanossa ja sivuvirtojen hyötykäyttökohteissa. Osassa tehtaista puupohjaiset sivuvirrat kuten kuori ja lietteet toimitettiin energiantuotantoon tehdasalueen ulkopuolelle, jolloin ravinnepiitoiset tuhkat eivät sisältyneet tarkastelun rajaukseen. Tehdasesimerkeissä korostui myös ravinteiden kierrätyksen ajankohtaisuus – uusia ravinteita säästäviä menetelmiä ja kierrätystä korostavia yhteistyökumppanuuksia oli omakuttu monissa tehtaissa.

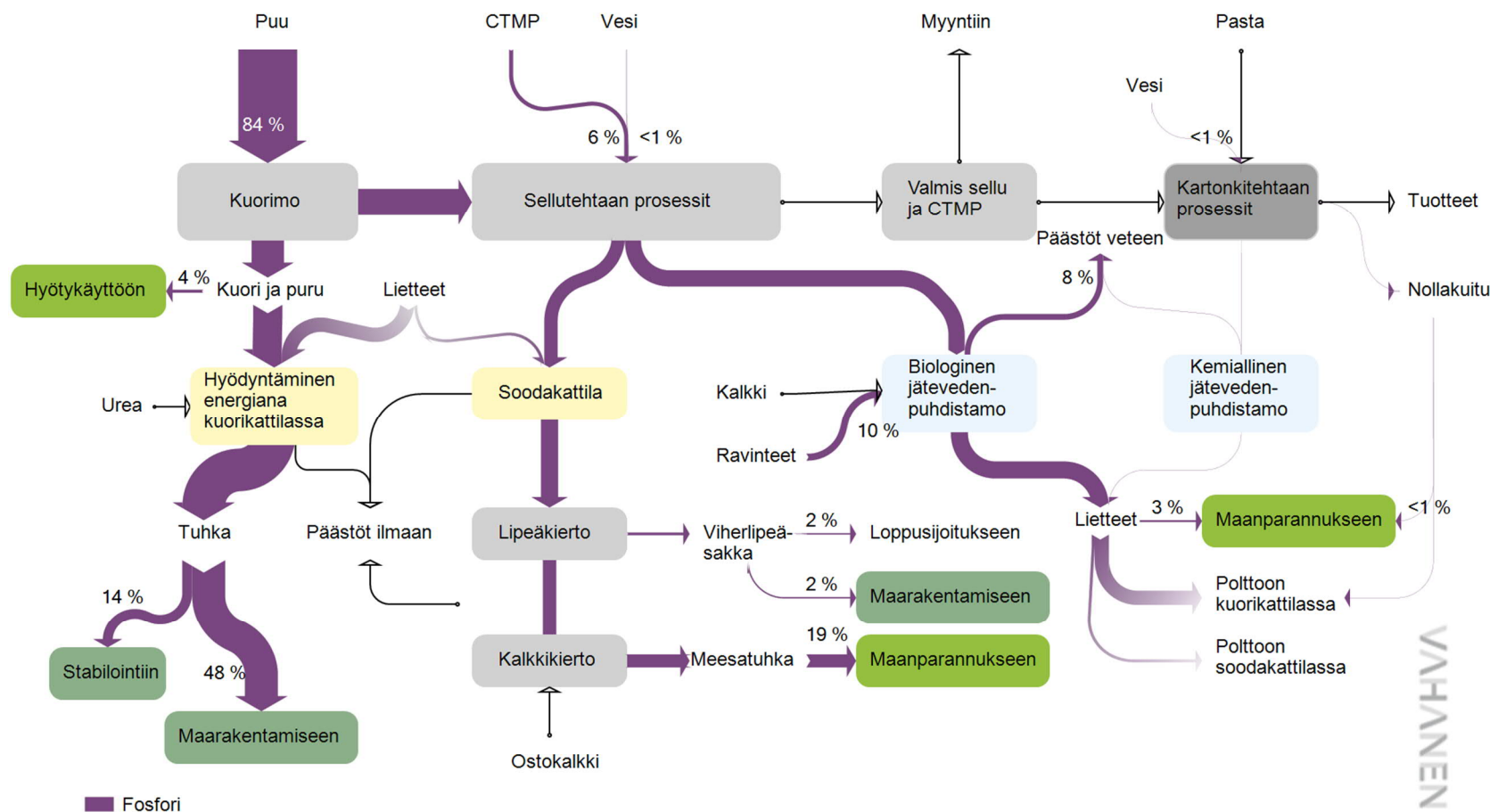
4.2.1 Stora Enso Imatra

Stora Enson Imatran tehdasympäristö koostuu kahdesta tuotantoyksiköstä: Kaukopään ja Tainionkosken sellu- ja kartonkitehtaista. Tehdasalueelle sijaitsee kaksi jätevedenpuhdistamoa, biologinen aktiivilietelaitos ja kemiallinen puhdistamo. Biologiselle puhdistamolle lisätään markkinoilta saatavia puhtaita ravinteita (ureaa ja fosforihappoa) ja neutraloinnissa käytetään poltettua kalkkia tai rikkihappoa. Tehtaiden yhteen laskettu tuotantokapasiteetti on 1 300 000 tonnia sellua ja 1 195 000 tonnia kartonkia, joista 435 000 tonnia päällystetään erityyppisillä muoveilla. Tehtaiden raakavedet otetaan Saimaasta ja laskelmissa käytettiin vuoden 2020 lähtötietoja.

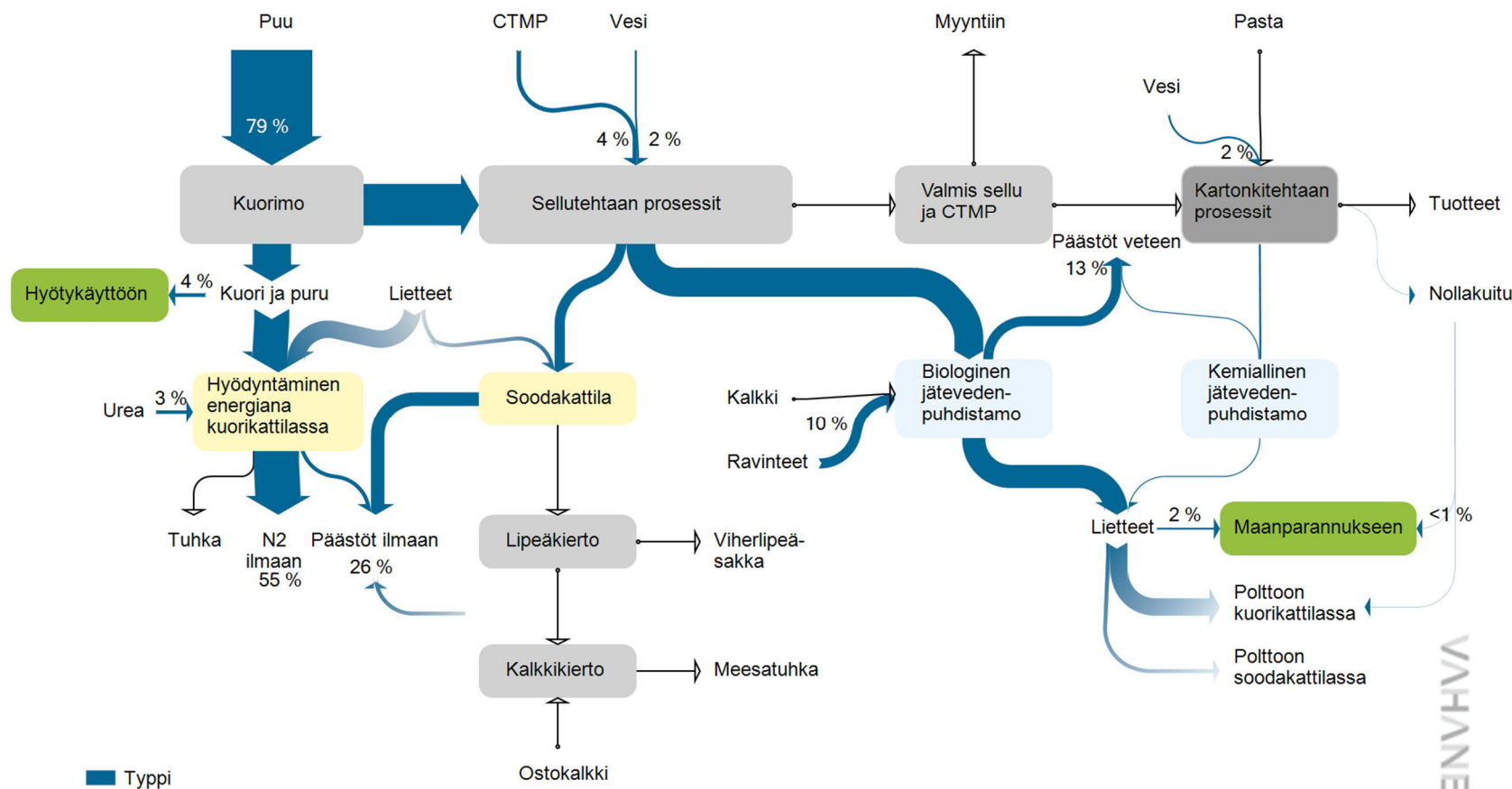
Tehdasalueella kiertävästä tyyppistä ja fosforista suurin osa poistuu prosessista kuoren ja biologisen jätevedenpuhdistamon lietteen mukana (kuvat 8 ja 9). Suurin osa kuoresta ja lietteestä hyödynnetään energiana tehdasalueen kuorikattilassa. Kuorikattilaan ruiskutetaan ureaa, jolloin suurin

osa kuoren ja lietteiden sisältämästä tyyppistä vapautuu ilmakehään alkuainyttypenä (N_2). Loput tyyppistä vapautuu päästöinä ilmaan typen oksideina. Poltettaessa kuorta ja lietettä niiden sisältämä fosfori, kalium ja kalsium konsentroituvat kuorikattilan tuhkiin, joista sekä pohjatuhka että lentotuhka toimitetaan hyötykäyttöön maarakentamiseen. Tuhkan sisältämä fosfori ei siten päädy hyödynnettäväksi. Fosforista päätyy kierrätykseen kuitenkin noin viidesosa meesatuhkan mukana. Osa kuoresta myydään hyötykäyttöön ja osa lietteestä toimitetaan maanparannuskäyttöön. Kaliumia poistuu prosessista eniten jätevedenpuhdistamon poistovesien mukana (kuva 11).

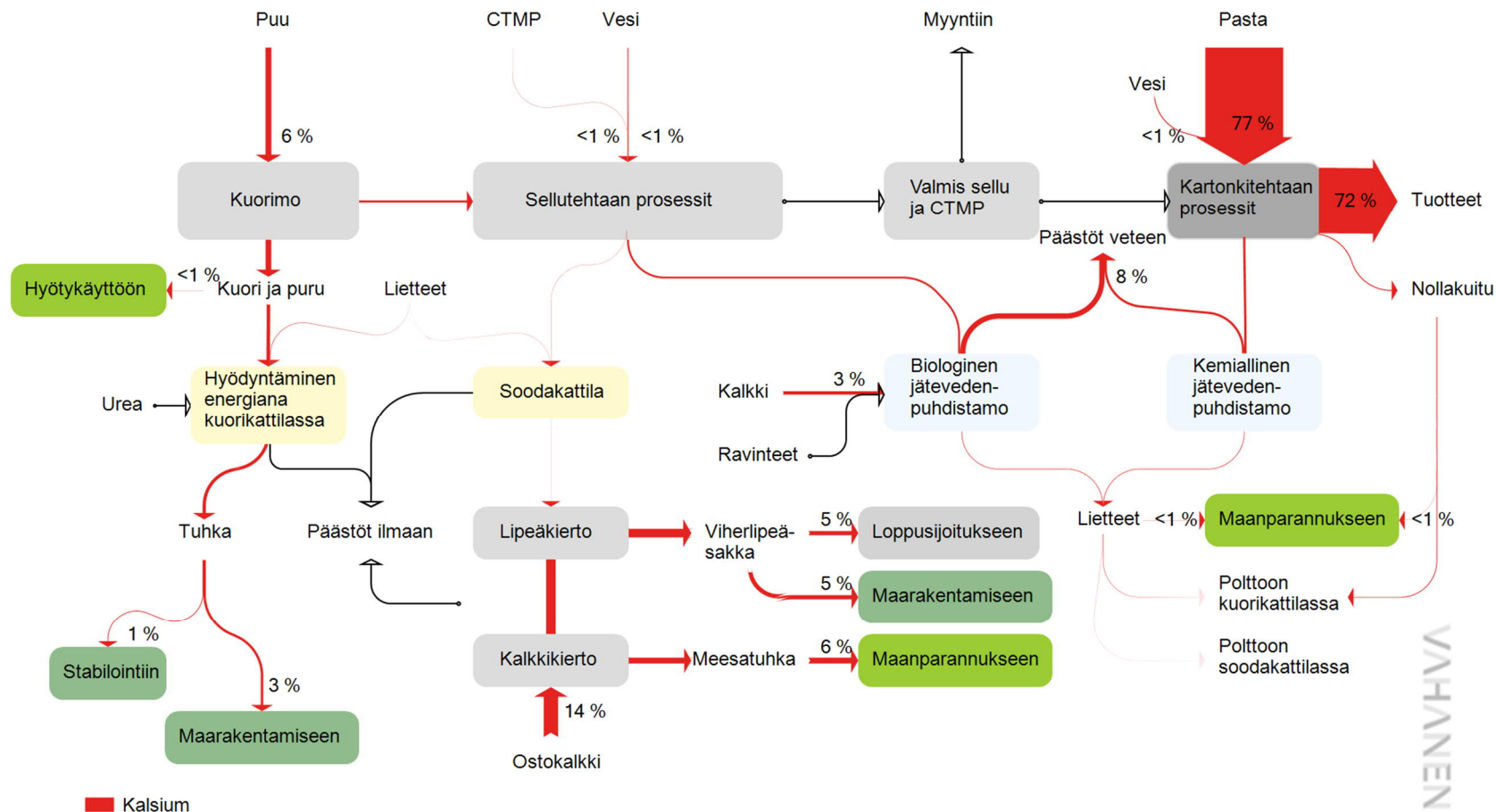
Kalsiumia kiertää prosessissa eniten kartonkitehtaan puolella, josta se poistuu lähinnä tuotteiden mukana (kuva 10). Merkittävimpiä kalsiumpitoisia sivuvirtoja ovat kuori, tuhka, meesatuhka ja viherlipeäsakka. Erityisesti viherlipeäsakassa ja meesatuhkassa on korkeat kalsiumpitoisuudet. Meesatuhka toimitetaan kokonaisuudessaan maanparannuskäyttöön, jolloin kalsium päätyy kiertoon, mutta viherlipeäsakasta vähän yli puolet päätyy tällä hetkellä lopusijoitukseen kaatopaikalle.



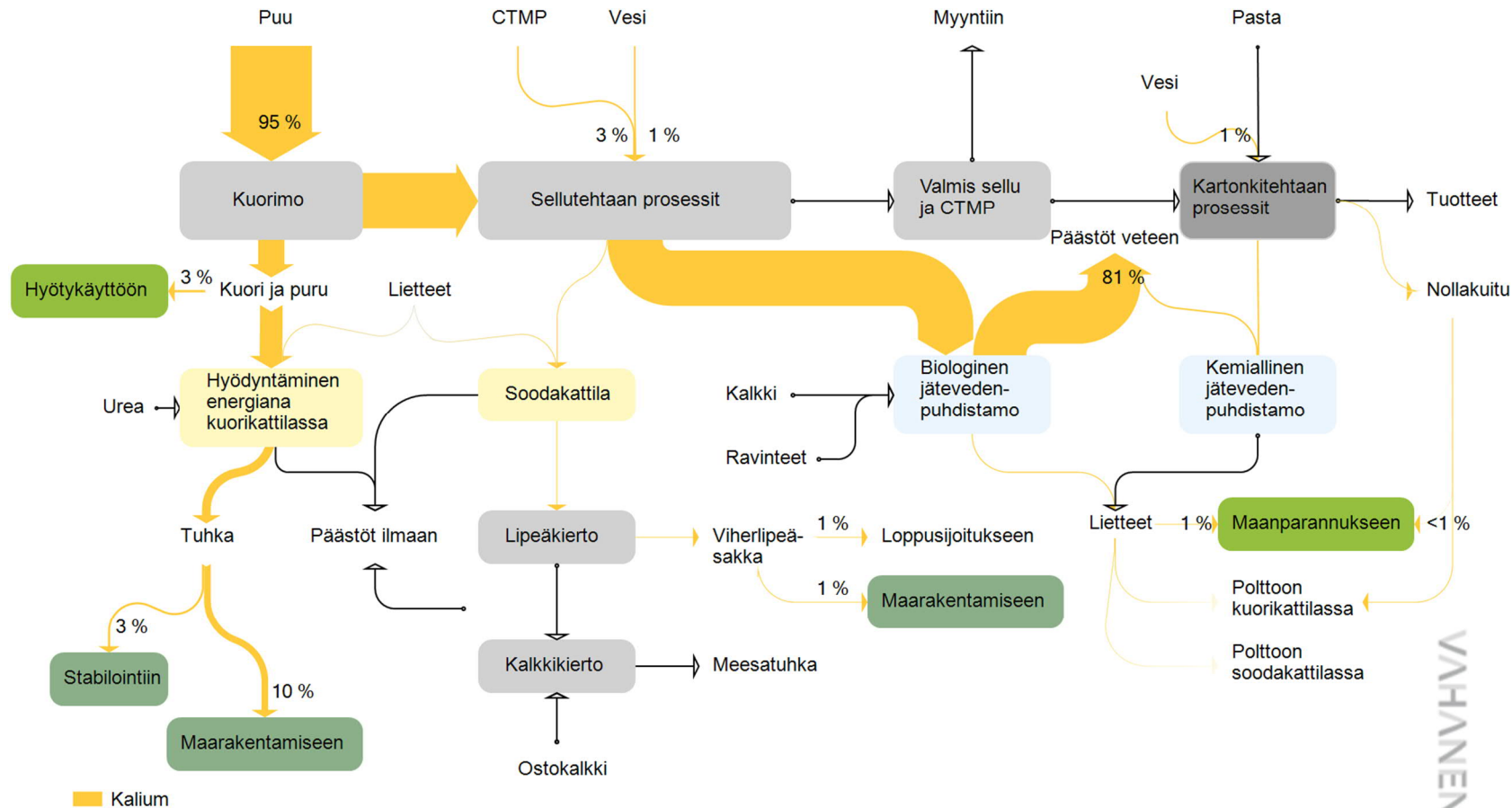
Kuva 8. Imatran tehdasympäristön fosforitase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän fosforin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä fosforista päättyy kuorikattilan tuhkaan ja edelleen hyötykäyttöön joko maarakentamiseen tai stabilointiaineeksi, jolloin ravinteiden kierrätystä ei tapahdu. Fosforia päättyy kierrätykseen meesatuhkan, jätevedenpuhdistamojen lietteiden ja kuoren muodossa.



Kuva 9. Imatran tehdasympäristön tyypitase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän typen määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä tyypestä päätyy kuorikattilaan polttoon ja vapautuu ilmaan joko alkuainetyyppinä (N₂) tai typen oksideina (NO_x), jolloin ravinteiden kierrätystä ei tapahdu. Tyypeä päätyy kierrätykseen jätevedenpuhdistamojen lietteiden ja kuoren muodossa.



Kuva 10. Imatran tehdasympäristön kalsiumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kalsiumin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä kalsiumista kiertää kartonkitehtaan prosesseissa ja poistuu kartonkituotteiden mukana. Kalsiumia päätyy myös kuorikattilan tuhkaan, meesatuhkaan, viherlipesakkaan, nollakuituun ja jätevedenpuhdistamojen lietteisiin. Kalsiumia päätyy kierrätykseen meesatuhkan, jätevedenpuhdistamojen lietteiden ja kuoren muodossa.



Kuva 11. Imatran tehdasympäristön kaliumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kaliumin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä kaliumista päätyy vesistöihin. Sivuvirroista kaliumia on eniten kuorikattilan tuhassa, josta se päätyy hyötykäyttöön joko maarakentamiseen tai stabilointiaineksi, jolloin ravinteiden kierrätystä ei tapahdu. Kaliumia päätyy kierrätykseen jätevedenpuhdistamojen lietteiden ja kuoren muodossa.

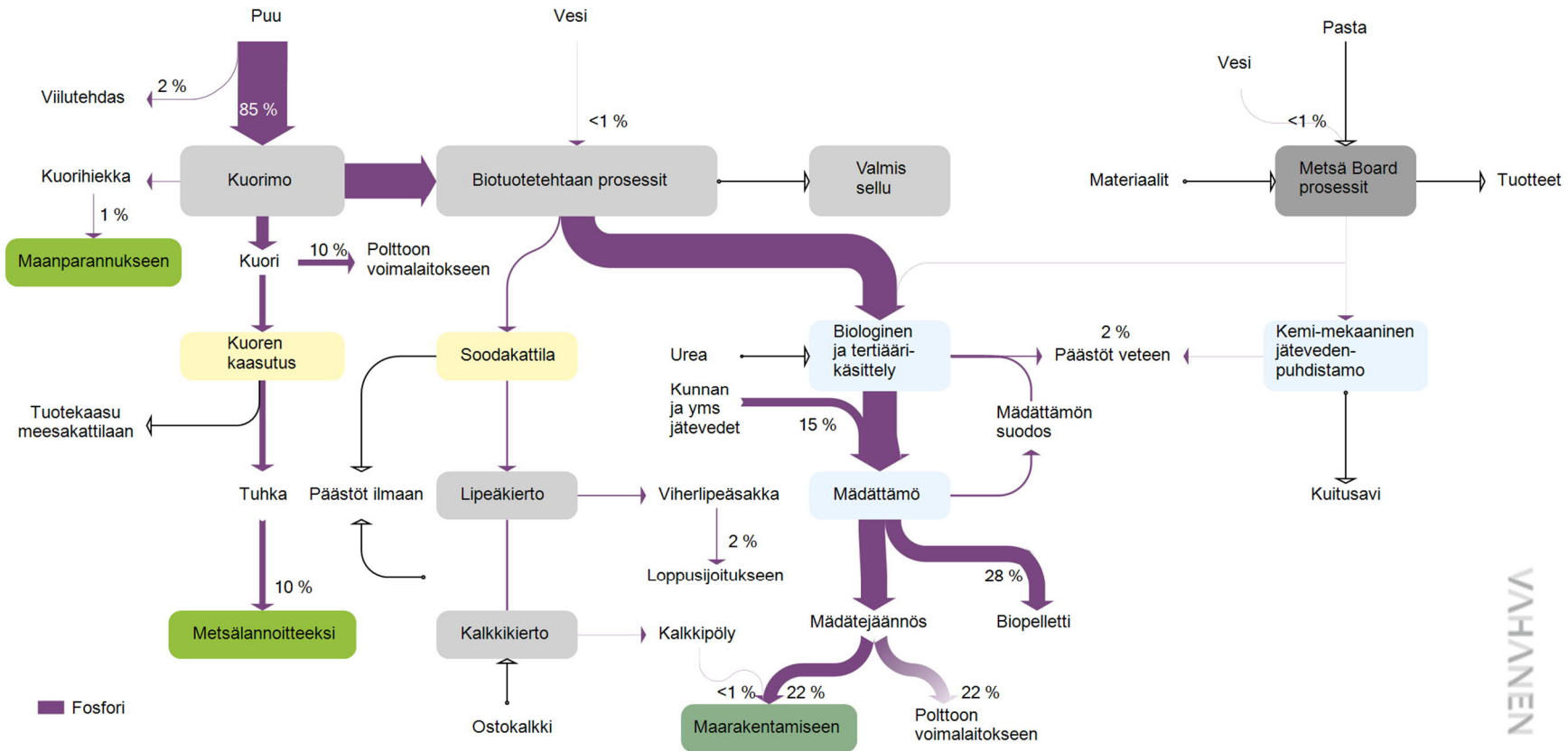
4.2.2 MetsäFibre Äänekoski

Metsän Äänekosken tehdasympäristö koostuu MetsäFibren biotuotetehtaasta, Metsä Boardin kartonkitehtaasta ja Metsä Woodin viilutehtaasta. Tehtaissa tuotetaan sellua, kartonkia, viilua ja lisäksi paljon erilaisia muita biotuotteita tai kemikaaleja kuten mäntyöljyä, tärpähtiä, tuotekaasua ja rikkihappoa. Tehtaiden yhteen laskettu tuotantokapasiteetti on 1 300 000 tonnia sellua, 47 000 tonnia viilua ja 260 000 tonnia kartonkia. Tehtaiden raakavesi otetaan Keiteleestä ja laskelmissa käytettiin pääosin vuoden 2020 lähtötietoja. Joidenkin sivuvirtojen määrissä käytettiin tehtaan suosituksesta vuosien 2019 ja 2020 keskiarvoja.

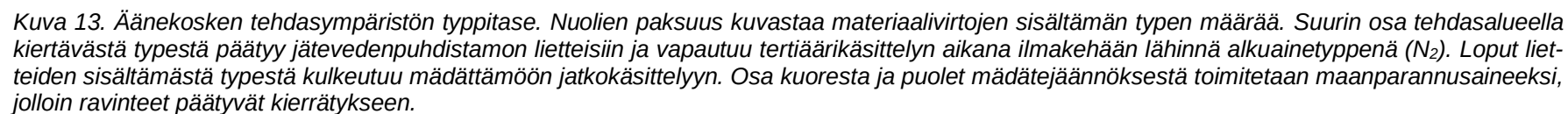
Tehdasalueella kiertävästä tuestä ja fosforista suurin osa poistuu prosessista kuoren ja lietteen mukana (kuvat 12–13). Tehdasalueella syntyvästä kuoresta puolet kaasutetaan tuotekaasuksi biotuotetehtaan omaan käyttöön, minkä ansiosta tehdas ei kuluta lainkaan fossiilista energiaa. Toinen puolisko kuoresta toimitetaan hyötykäyttöön polttoaineeksi. Kuorihiekka toimitetaan maanparannusaineeksi. Poltettaessa kuorta fosfori, kalsium ja kalium konsentroituvat kuorikattilan tuhkiin, jotka toimitetaan metsälannoitteeksi. Fosforista päätyy kierrätykseen noin 10 % kaasuttimen tuhkan mukana, joka toimitetaan metsälannoitukseen.

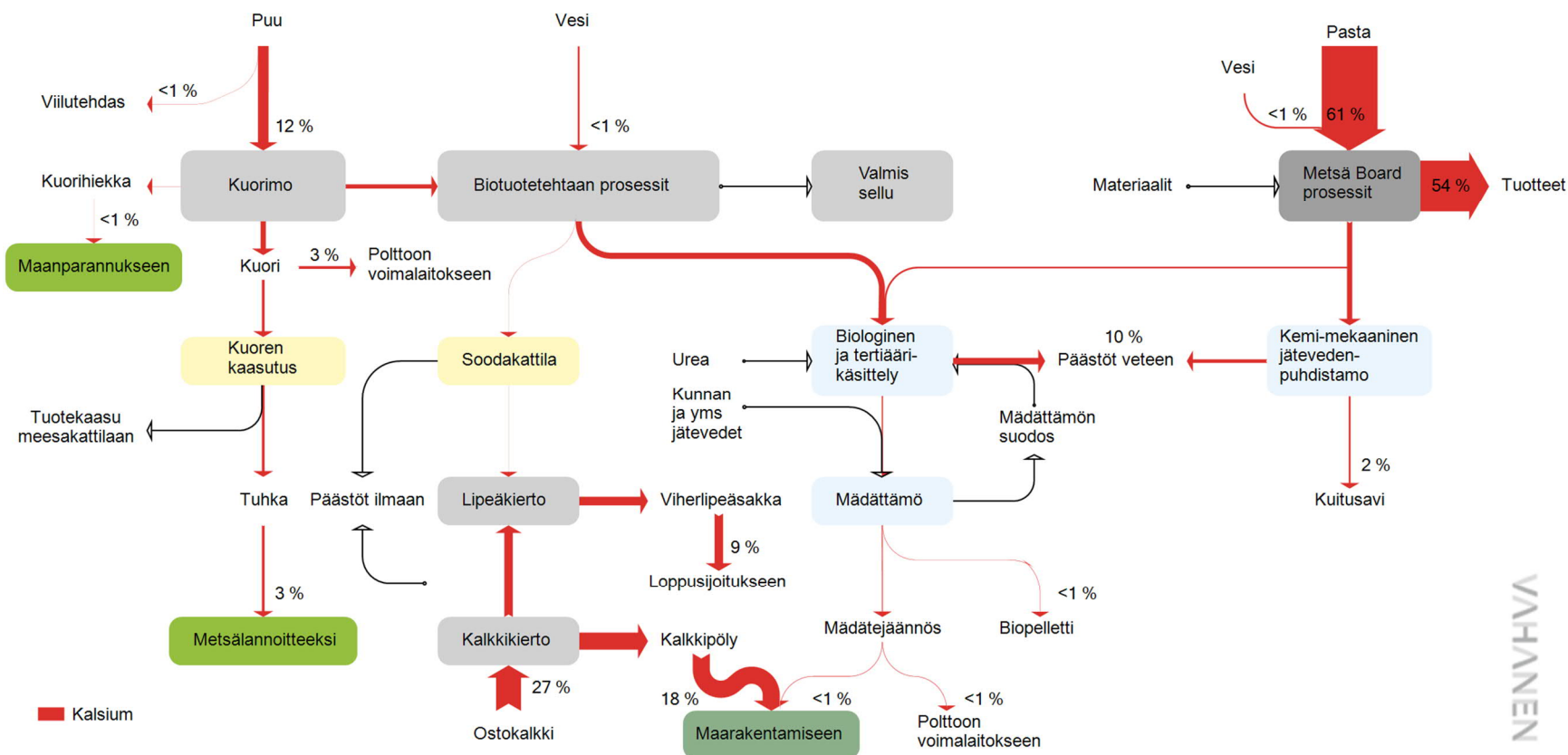
Kalsiumia kiertää Äänekoskella eniten kartonkitehtaan puolella, josta se poistuu tuotteiden ja kemiallis-mekaanisen jätevedenpuhdistamon kautta (kuva 14). Kalkkipöly toimitetaan lannoitusaineeksi ja viherlpeäsakka loppusijoitetaan kaatopaikalle.

Jätevedenpuhdistamolle kulkeutuvat ravinteet sitoutuvat lietteeseen, joka johdetaan tehdasalueella sijaitsevalle mädättämölle. Jätevedenpuhdistamolla käsitellään myös Äänekosken kunnan jätevedenpuhdistamon suodosvesiä. Mädättämöllä lietteestä syntyy mädätejäännöstä, biopellettejä ja biokaasua. Osa mädätejäännöksestä poltetaan kuorikattilassa/voimalaitoksella, jolloin typpi joutuu pois ravinnekierrrosta päästöinä. Loput toimitetaan hyötykäyttöön maarakennukseen. Typpeä poistuu jonkin verran ravinnetaseen ulkopuolelle sivuvirtojen mukana, joista merkittävin on hyötykäyttöön toimitettava kuori. Fosforia päätyy etenkin biopelletteihin, jotka toimitetaan tehdasalueen ulkopuolelle energiahyötykäyttöön. Kaliumia poistuu prosessista eniten jätevedenpuhdistamon poistovesien mukana (kuva 15).

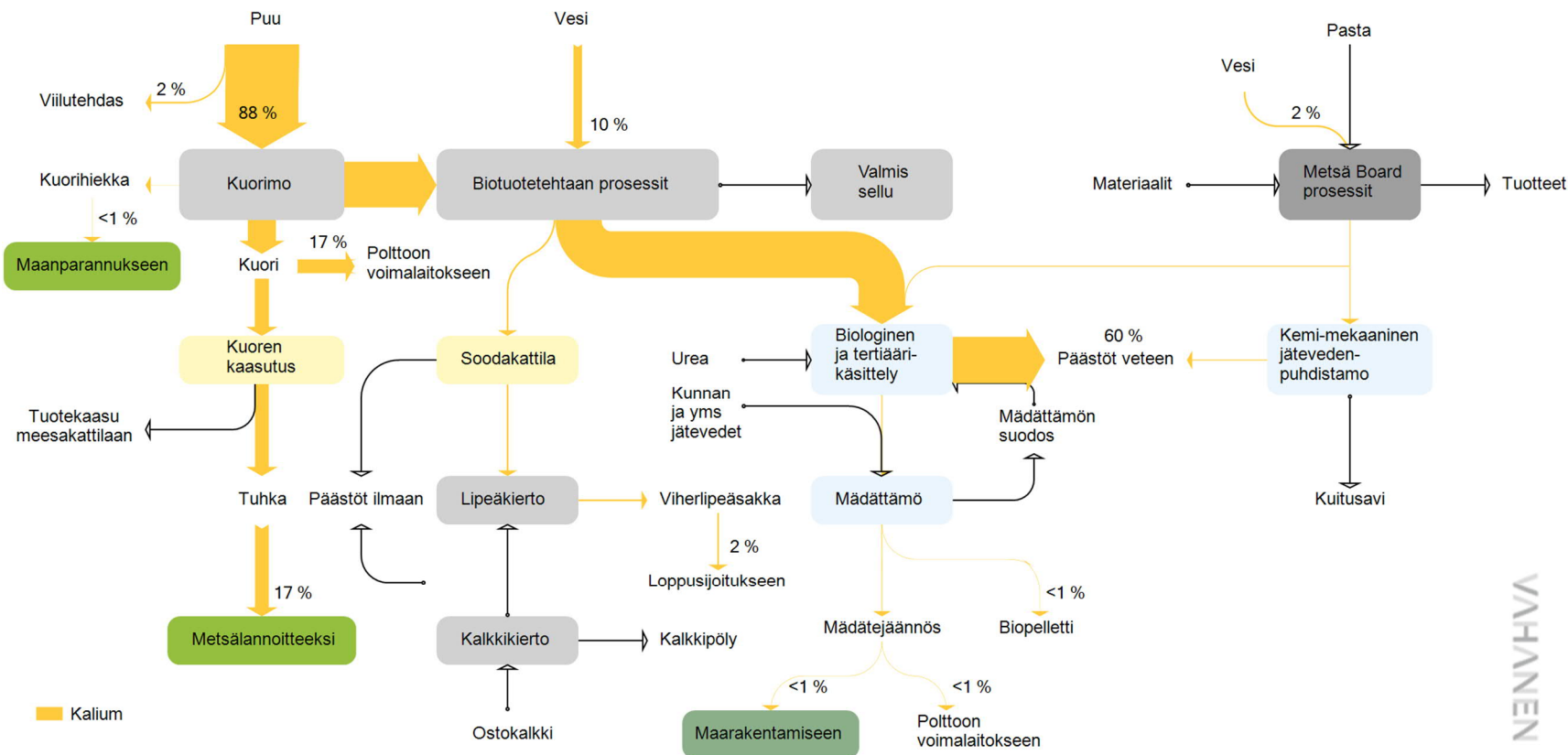


Kuva 12. Äänekosken tehdasympäristön fosforitase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän fosforin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä fosforista päätyy jätevedenpuhdistamon lietteisiin ja edelleen mädättämöön jatkokäsittelyyn. Kuorihiiekka, kaasuttimen tuhka, osa kuoresta ja puolet mädätejäännöksestä toimitetaan maanparannusaineeksi, jolloin ravinteet päätyvät kierrätykseen.





Kuva 14. Äänekosken tehdasympäristön kalsiumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kalsiumin määrää. Suurin osa tehdas-alueella kiertävästä kalsiumista kiertää kartonkitehtaan prosesseissa ja poistuu kartonkituotteiden mukana. Kuorihiekka, kaasuttimen tuhka, kalkkipöly, osa kuoresta ja puolet mädatejäänöksestä toimitetaan maanparannusaineeksi, jolloin ravinteet päätyvät kierrätykseen. Kalsiumipitoinen viherlipesakka toimitetaan loppusijoitukseen.



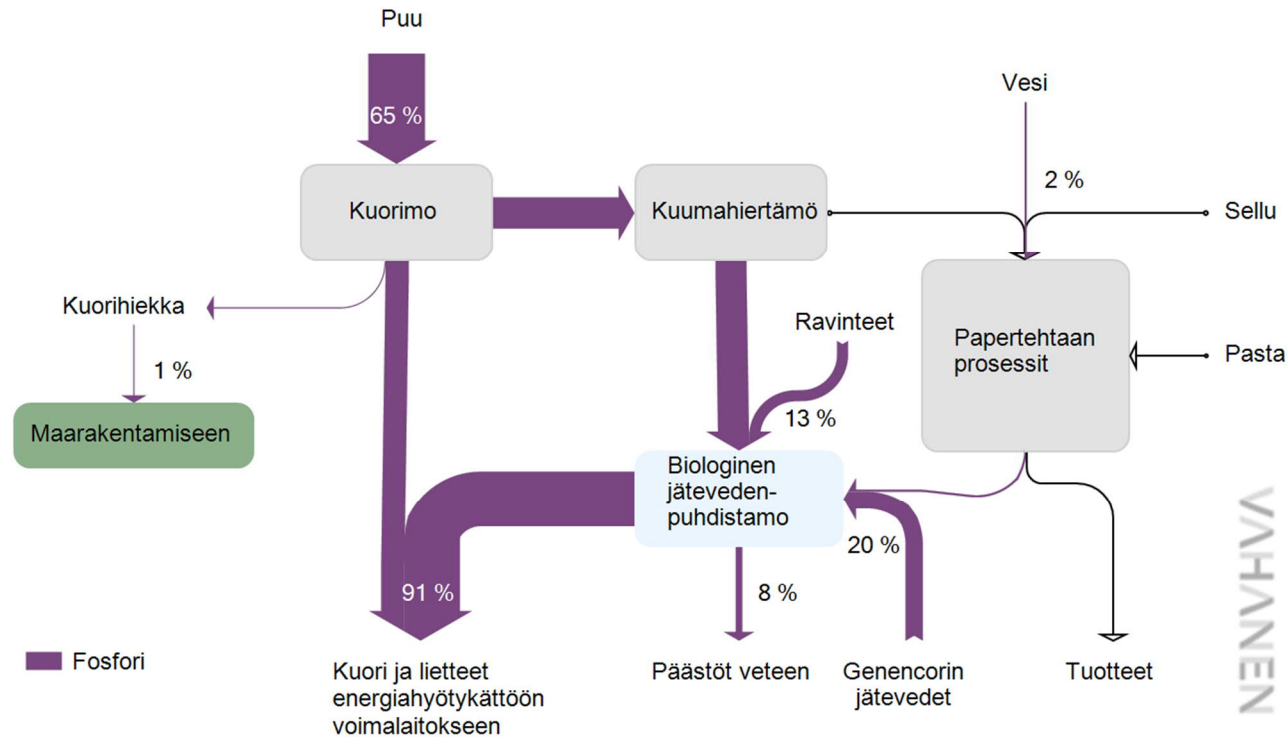
Kuva 15. Äänekosken tehdasympäristön kaliumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kaliumin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä kaliumista päätyy vesistöihin. Sivuvirroista kaliumia esiintyy eniten tuotekaasussa. Kuorihiekka, kaasuttimen tuhka, osa kuoresta ja puolet mädätejäännöksestä toimitetaan maanparannusaineeksi, jolloin ravinteet päätyvät kierrätykseen.

4.2.3 UPM Jämsänkoski

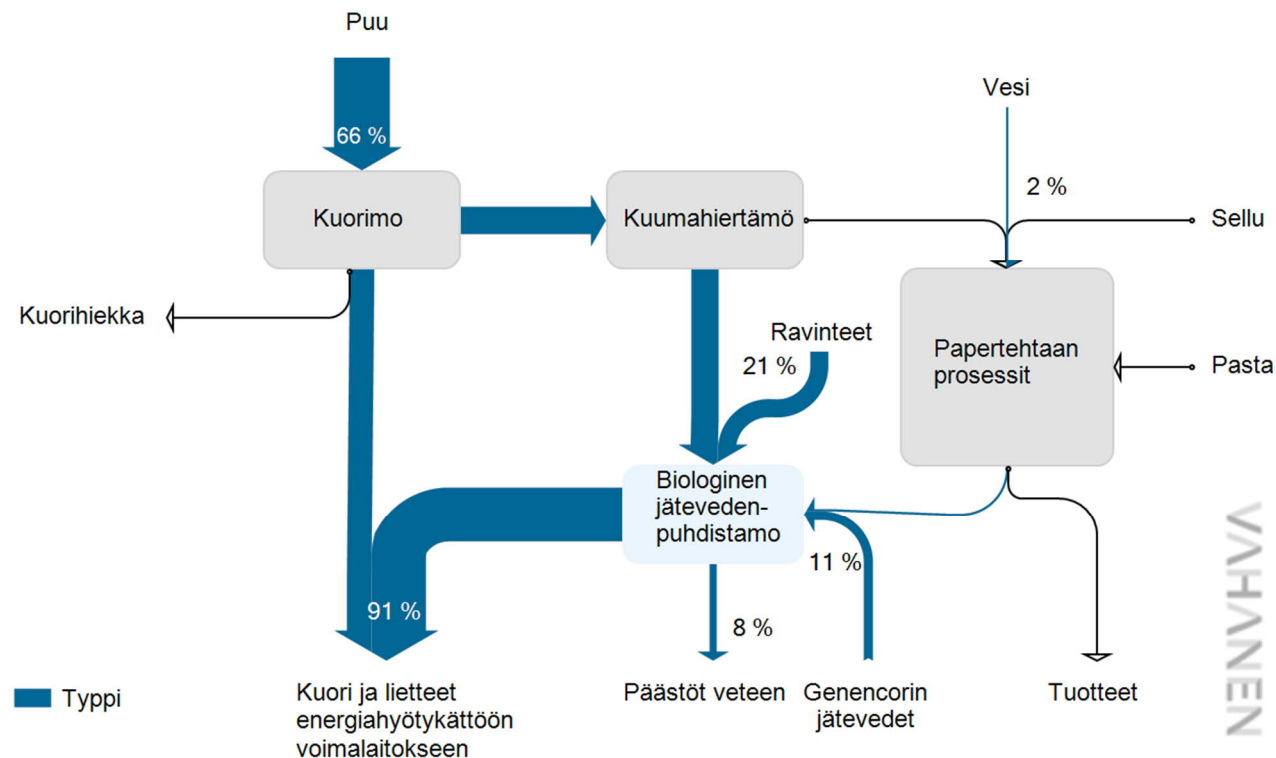
UPM:n Jämsänkosken paperitehdas tuottaa päällystämätöntä aikakauslehtipaperia sekä tarra- ja pakkauspaperia. Tehtaan tuotantokapasiteetti on 630 000 tonnia paperia. Tehdasalueella sijaitsee myös kuorimo, biologinen jätevedenpuhdistamo ja biovoimala. Kuorimossa kuoritaan kuusikuitupuuta kuumahiertämistä varten. Voimalassa tuotetaan energiaa tehtaan ja alueen tarpeisiin polttamalla Jämsänkoskella syntyviä puupohjaisia sivuvirtoja sekä muun muassa turvetta ja metsähaketta, mistä syystä voimalan päästöjä tai tuhkia ei ole huomioitu Jämsänkosken paperitehtaan ravinnetaseessa. Jätevedenpuhdistamolle lisätään ureaa ja fosforihappoa. Tehtaan raakavesi otetaan Koski-Keskisestä ja Iso-Ryönistä. Laskelmissa käytettiin vuoden 2019 lähtötietoja.

Tehtaalla kiertävästä typestä ja fosforista suurin osa poistuu prosessista kuoren ja lietteen mukana (kuvat 16–17). Liete sisältää myös läheisen Genencorin entsyymitehtaan jätevesien ravinteita sekä jätevedenpuhdistamolla lisättyjä ravinteita.

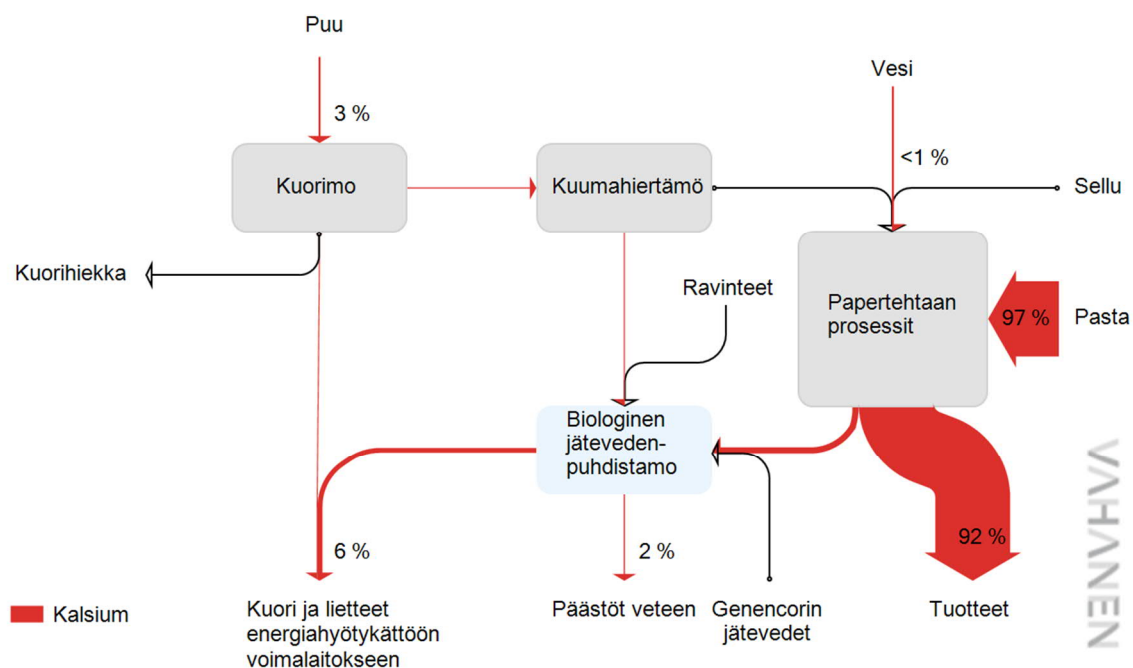
Kaikki kuori ja liete toimitetaan voimalaan polttoon. Voimalassa syntyy polton sivutuotteena tuhkaa, joka toimitetaan hyötykäyttöön (lähinnä maarakentamiseen). Kierrätykseen päätyvää fosforin määrää ei ollut tiedossa, koska voimalan tuhkat eivät sisältyneet tehdasalueen rajaukseen. Voimalassa poltetaan myös muita kuin Jämsänkosken tehtaalla syntyviä biopolttoaineita. Kalsiumia tulee puun ohella tehtaalle pastan raaka-aineissa ja sitä poistuu erityisesti valmiiden tuotteiden mukana (kuva 18). Kaliumia poistuu prosessista eniten jätevedenpuhdistamon poistovesien mukana (kuva 19).



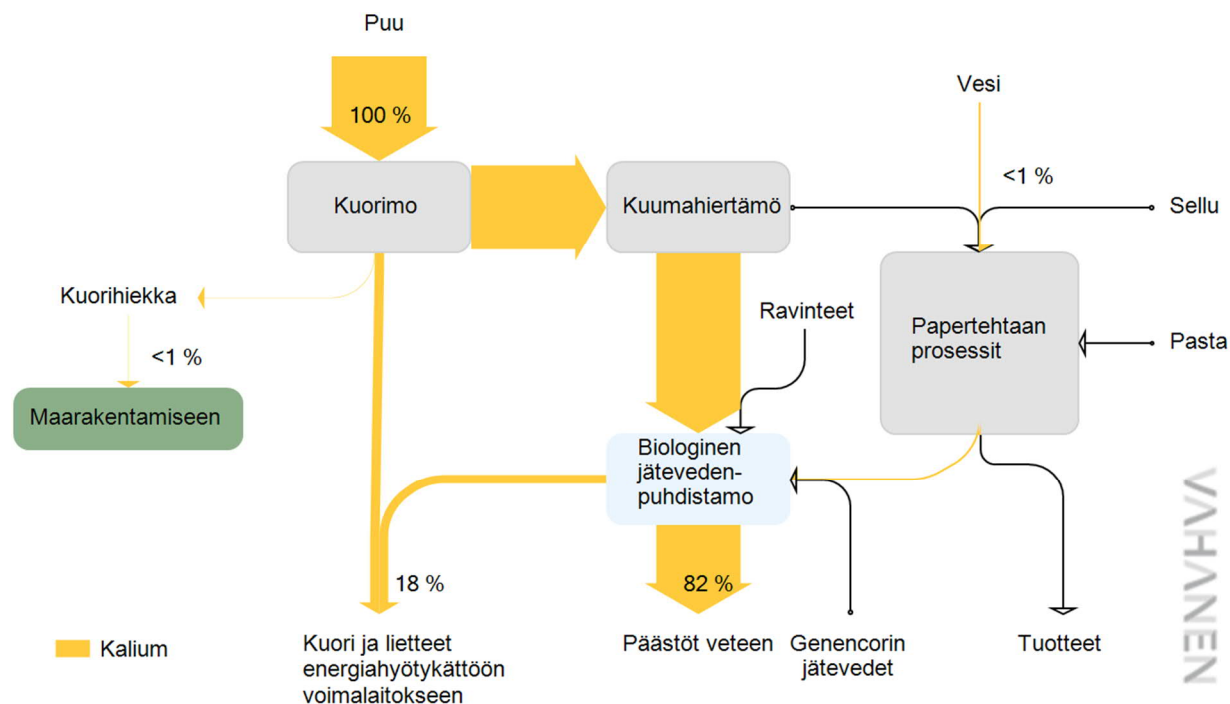
Kuva 16. Jämsänkosken paperitehtaan fosforitase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän fosforin määrää. Lähes kaikki tehdasalueella kiertävästä fosforista päätyy kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana energiantuotantoon alueen voimalaitokseen. Voimalaitoksen tuhkat eivät sisällyneet taselaskelman rajaukseen. Kuorihiekka toimitetaan maarakennusaineeksi, jolloin ravinteiden kierrätystä ei tapahdu.



Kuva 17. Jämsänkosken paperitehtaan tyypitase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän typen määrää. Lähes kaikki tehdas-alueella kiertävästä timestä päätty kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana energiahyötykäyttöön alueen voimalaitokseen. Voimalaitoksen ilmastopäästöt eivät sisältyneet taselaskelman rajaukseen.



Kuva 18. Jämsänkosken paperitehtaan kalsiumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kalsiumin määrää. Lähes kaikki tehdasalueella kiertävästä kalsiumista päätyy paperituotteisiin. Kalsiumia päätyy myös kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana energian tuotantoon alueen voimalaitokseen. Voimalaitoksen tuhkat eivät sisältyneet taselaskelman rajaukseen.



Kuva 19. Jämsänkosken paperitehtaan kaliumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kaliumin määrää. Lähes kaikki tehdasalueella kiertävästä kaliumista päätyy vesistöihin. Kaliumia päätyy myös kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana energiantuotantoon alueen voimalaitokseen. Voimalaitoksen tuhkat eivät sisällyneet taselaskelman rajaukseen. Kuorihiekka toimitetaan maarakennusaineeksi, jolloin ravinteiden kierrätystä ei tapahdu.

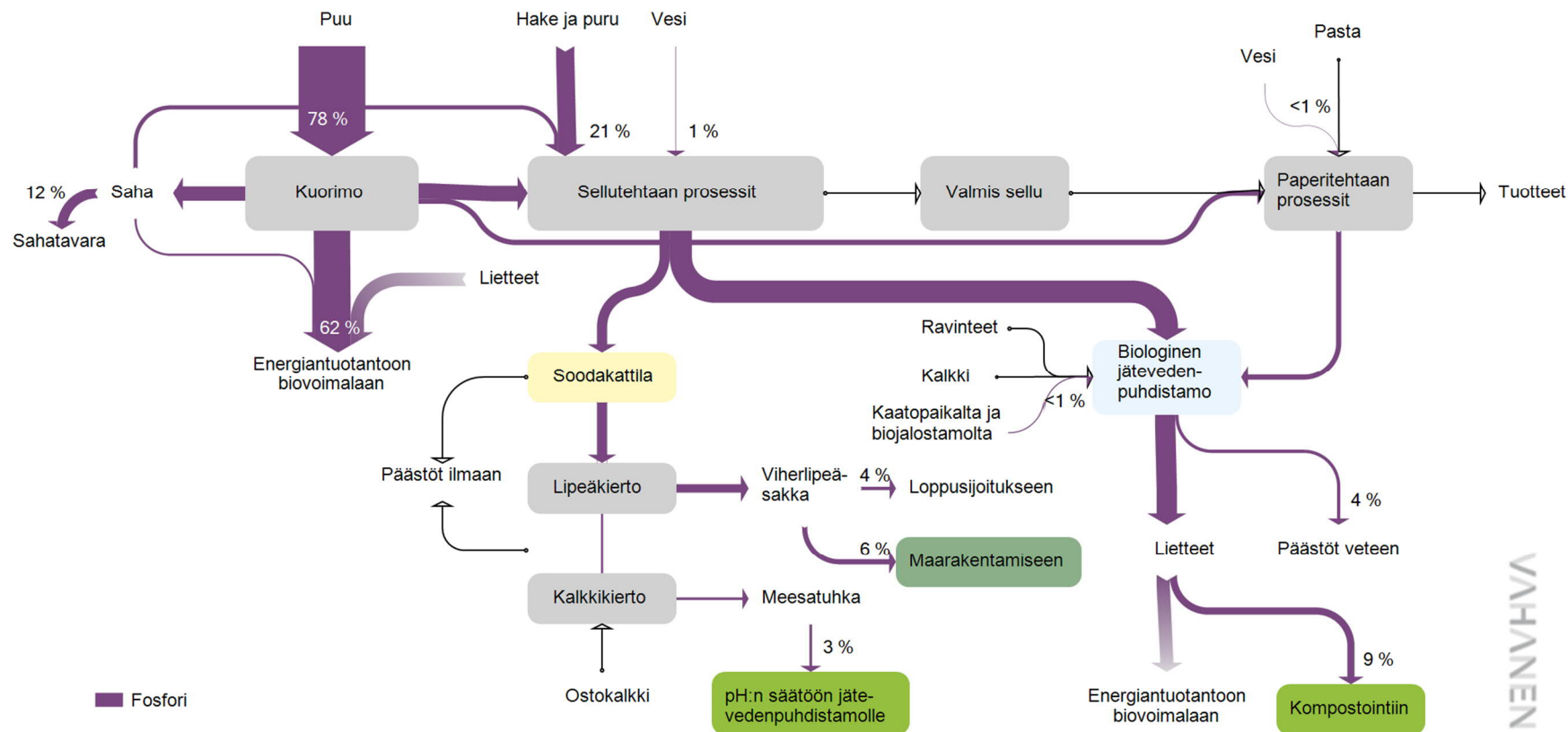
4.2.4 UPM Kaukas

UPM:n Kaukaan tehdasympäristö koostuu sellutehtaasta, biojalostamosta, paperitehtaasta ja sahasta. Tehdasalueella sijaitsee myös biologinen aerobinen jätevedenpuhdistamo ja biovoimala. Jätevedenpuhdistamolle lisätään typpiravinnetta, josta noin 30 % on kierrätystyppeä tehtaan ulkopuolelta. Jätevedenpuhdistamolle lisätään myös poltettua kalkkia. Biovoimalassa poltetaan tehdasalueen puupitoisien sivuvirtojen lisäksi myös ulkopuolelta tulevia materiaaleja, mistä syystä voimala on jätetty tämän tasetarkastelun ulkopuolelle. Tehtaiden yhteen laskettu tuotantokapasiteetti on 770 000 tonnia sellua, 305 000 tonnia paperia, 510 000 kuutiota sahatavaraa ja 130 000 tonnia biopolttoaineita. Tehdasalueen raakavesi otetaan Saimaasta ja laskennassa käytettiin vuoden 2020 lukuja.

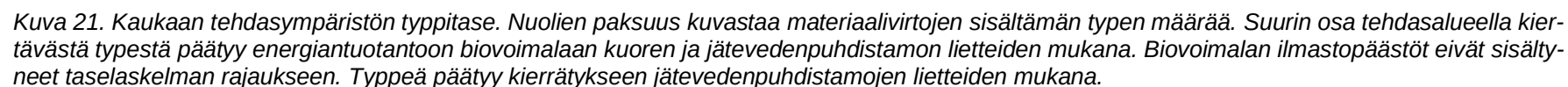
Tehdasalueella kiertävästä tuestä ja fosforista suurin osa poistuu prosessista kuoren ja lietteen mukana (kuvat 20 ja

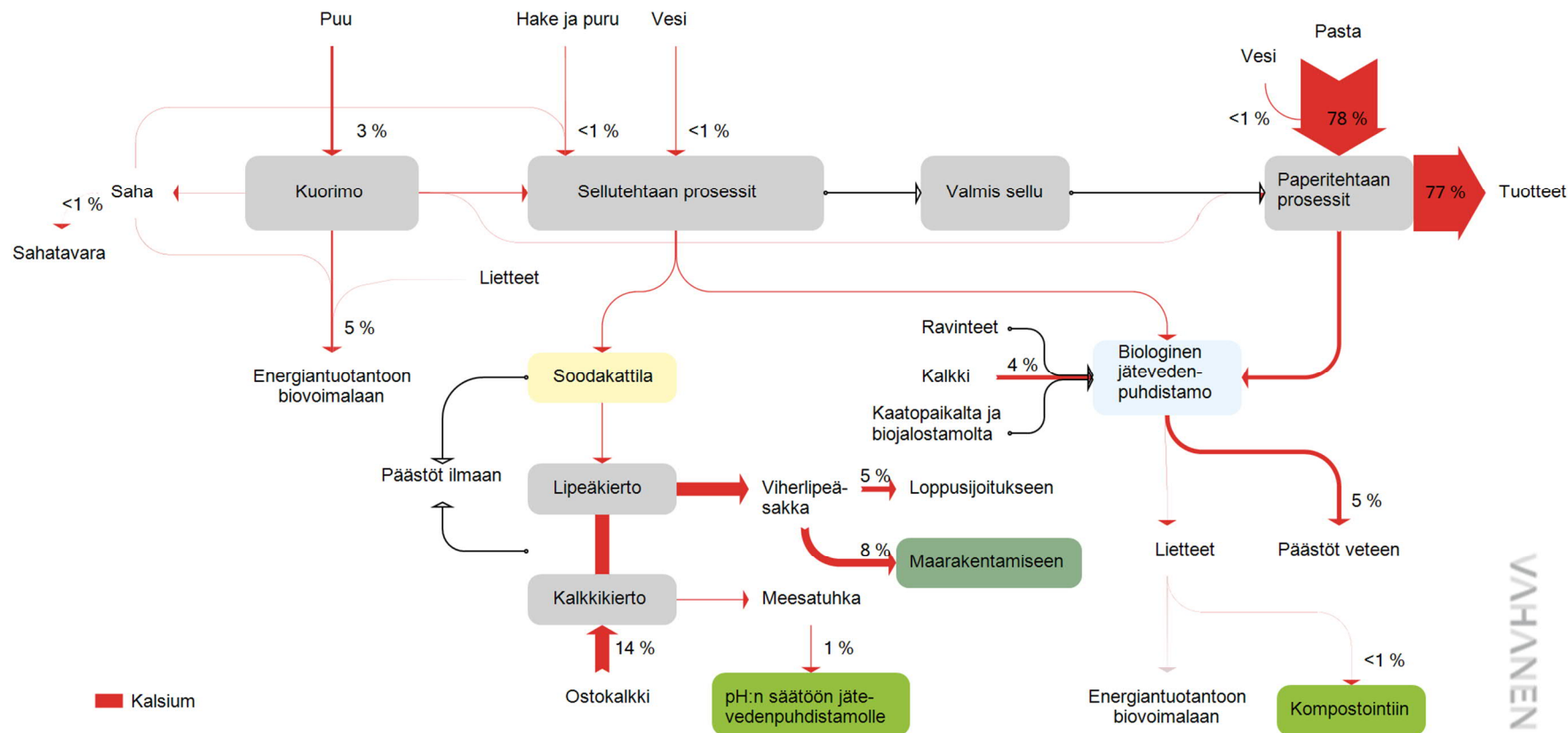
21). Kaikki tehdasalueella syntyvästä kuoresta ja 65 % lietteestä toimitetaan energiahyötykäyttöön biovoimalaan. Loput lietteestä toimitetaan hyötykäyttöön kompostointiin. Tehdasalueen biologisella jätevedenpuhdistamolla käsitellään myös kaatopaikan suodosvesiä, joiden ravinteet päätyvät pääosin lietteeseen. Fosforista päätyy kierrätykseen ainakin noin 12 % meesatuhkan ja lietteiden mukana. Biovoimalan tuhkat eivät sisällyneet tehdasalueen rajaukseen. Voimalassa poltetaan myös muita kuin Kaukaan tehtaalla syntyviä biopolttoaineita.

Kalsiumia kiertää Kaukaalla eniten paperitehtaan puolella, josta se poistuu tuotteiden ja jätevedenpuhdistamon kautta (kuva 22). Kalsiumpitoisista sivuvirroista erityisesti meesatuhkalla ja viherlipeäsaakalla on korkea kalsiumpitoisuus. Meesatuhka toimitetaan jätevedenpuhdistamolle pH:n säätöön ja viherlipeäsaakasta suurin osa hyödynnetään maarakentamisessa ja loput loppusijoitetaan kaatopaikalle. Kaliumia poistuu prosessista eniten jätevedenpuhdistamon poistovesien mukana (kuva 23).

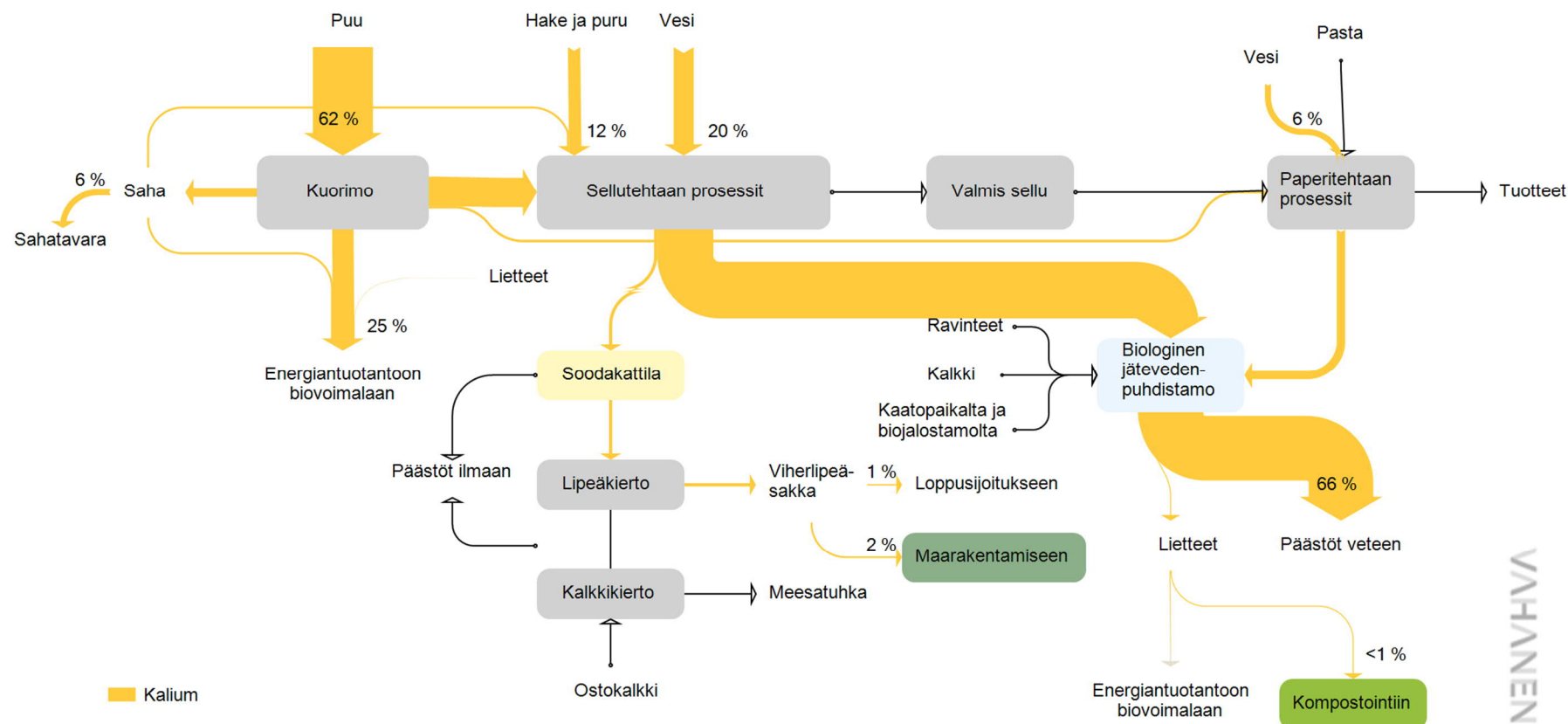


Kuva 20. Kaukaan tehdasympäristön fosforitase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän fosforin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä fosforista päätyy energiantuotantoon biovoimalaan kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana. Biovoimalan tuhkat eivät sisällyneet taselaskelman rajaukseen. Fosforia päätyy kierrätykseen meesatuhkan ja jätevedenpuhdistamojen lietteiden mukana.





Kuva 22. Kaukaan tehdasympäristön kalsiumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kalsiumin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä kalsiumista kiertää paperitehtaan prosesseissa ja poistuu paperituotteiden mukana. Jonkin verran kalsiumia päätyy energiantuotantoon biovoimalaan kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana. Biovoimalan tuhkat eivät sisällyneet taselaskelman rajaukseen. Kalsiumia päätyy kierrätykseen meesatuhkan ja jätevedenpuhdistamojen lietteiden mukana. Kalsiumpitoinen viherlipeäsakka toimitetaan joko maarakennusaineeksi tai loppusijoitukseen, jolloin ravinteiden kierrätystä ei tapahdu.



Kuva 23. Kaukaan tehdasympäristön kaliumtase. Nuolien paksuus kuvastaa materiaalivirtojen sisältämän kaliumin määrää. Suurin osa tehdasalueella kiertävästä kaliumista päätty vesistöihin. Kaliumia päätty myös energiantuotantoon biovoimalaan kuoren ja jätevedenpuhdistamon lietteiden mukana. Biovoimalan tuhkat eivät sisällyneet taselaskelman rajaukseen. Kaliumia päätty kierrätykseen jätevedenpuhdistamojen lietteiden mukana.

5 Tulosten tarkastelu

Metsäteollisuudessa syntyy runsaasti ravinteita sisältäviä sivuvirtoja. Metsäteollisuudessa puun kaikki osat hyödynnetään tarkasti ja lähes kaikki metsäteollisuuden sivutuotteet hyödynnetään edelleen jatkoprosesseissa.

Koko Suomen metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnetaseista on nähtävissä, että puun kuori on tärkeä ravinnelähde metsäteollisuudessa. Puun kuoren mukana tulee metsäteollisuuden ravinteista jopa 50 % kalsiumia lukuun ottamatta.

Puun poltolla korvataan fossiilisia polttoaineita. Energiantuotannossa syntyy lopputuotteena tuhkaa, johon kuoren sisältämät ravinteet, fosfori, kalium ja kalsium rikastuvat. Energiantuotantoon toimitetaan myös metsäteollisuudessa syntyviä erilaisia lietteitä. Puupohjaisia sivuvirtoja ovat myös puru ja hake, joista suurin osa palautetaan takaisin tuotantoprosesseihin. Metsäteollisuudessa syntyy myös muita sivuvirtoja kuten meesaa ja viherlipeäsakkaa.

Pääosa energiantuotannossa syntyvästä tuhkasta päätyy maarakentamiseen, jossa se korvaa neitseellisiä mineraaliaineita, mutta tuhkan ravinteet eivät päädy takaisin kiertoon. Tuhkaa ja jonkin verran muita sivuvirtoja, kuten lietteitä ja meesaa, hyödynnetään kuitenkin myös lannoitteena. Lannoitekäytössä sivuvirtojen sisältämällä ravinteilla voidaan korvata neitseellisiä ravinteita. Ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta lannoitekäyttöä voitaisiin edelleen lisätä. Sivuvirroilla on myös monia muita hyötykäyttökohteita. Loppusijoitukseen kaatopaikalle toimitetaan sivuvirroista vain pieni osa, lähinnä viherlipeäsakkaa.

Sivuvirtojen sisältämästä tyypestä päätyi vuonna 2019 vain noin 3 % ravinnekierrätykseen, koska suurin osa tyypestä vapautuu ilmakehään energiantuotannossa. Tyypeä päätyy energiantuotannon jälkeen toiseksi eniten maarakentamiseen (5 %), jossa ravinnetta ei hyödynnetä. Tyyppi ei kuitenkaan ole uusiutumaton ravinne, eikä sen kierrätys ole yhtä merkittävää kuin esimerkiksi fosforin. Typen kierrossa on kuitenkin tärkeää huomioida typen oksidien osuus ilmaan vapautuneesta tyypestä. Typen oksidit aiheuttavat luonnossa vesistöjen ja maaperän happamoitumista, ja niillä on korkeina pitoisuuksina haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen ja viihtyvyyteen. Lisäksi erityisesti leijupetikatti-loissa vapautuu dityppioksidia, joka on myös kasvihuonekaasu. Typen oksidien vapautumista ilmaan pyritään hillitsemään erilaisilla teknisillä menetelmillä tai palamisolosuhteita optimoimalla.

Sivuvirtojen sisältämästä fosforista päätyi vuonna 2019 noin 18 % lannoitekäyttöön. Eniten fosforia (64 %) toimitettiin maarakentamiseen, jossa ravinnetta ei hyödynnetä. Fosforista päätyi kuitenkin noin 14 % muuhun hyötykäyttöön, josta osa on päättänyt ravinnekierrätykseen esimerkiksi maanparannuskäytön muodossa. Loppusijoitukseen fosforia päätyi vain vähäinen määrä (4 %). Fosfori on uusiutumaton luonnonvara ja sitä on maapallolla rajallisesti, joten sen kierrättäminen on tärkeää.

Sivuvirtojen sisältämästä kaliumista päätyi vuonna 2019 noin 18 % ravinnekierrätykseen. Eniten kaliumia toimitettiin maarakentamiseen (68 %), jossa ravinnetta ei hyödynnetä. Kaliumista päätyi kuitenkin noin 11 % muuhun hyötykäyt-

töön, jossa ravinnetta on päätynt kierrätykseen esimerkiksi maanparannuskäytössä. Loppusijoitukseen kaliumia päätyi vain vähäinen määrä (3 %).

Kalsiumia tulee metsäteollisuuteen huomattavan paljon ostokalkin ja pastan mukana. Selluteollisuuden kalkkikiertoon lisätty poltettu kalkki poistuu kierrosta kalsiumpitoisten sivuvirtojen, kuten meesan ja viherlipeäsakan, mukana. Pääosa pastan sisältämästä kalsiumista poistuu kierrosta valmiiden paperi- ja kartonkituotteiden mukana. Pienempi osa kalsiumista päätyy jätevedenpuhdistamojen kautta lietteisiin ja vesistöihin.

Sivuvirtojen sisältämästä kalsiumista päätyi vuonna 2019 noin 22 % lannoitekäyttöön. Eniten kalsiumia toimitettiin maarakentamiseen (38 %), jossa ravinnetta ei hyödynnetä. Kalsiumia päätyi myös melko paljon muuhun hyötykäyttöön (22 %) ja loppusijoitukseen (17 %). Muussa hyötykäytössä osa kalsiumista päätyy ravinteiden kierrätykseen.

Tehdasympäristökohtaisissa ravinnetaseissa oli nähtävissä, että vaikka suuressa mittakaavassa ravinnekierrot ovat hyvin samankaltaisia eri tehtaissa, tehtaiden välillä on eroja ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta. Kaikissa esimerkkitehtaissa syntyi samoja sivuvirtoja, mutta näiden sivuvirtojen ravinnepitoisuudet vaihtelivat tehtaiden välillä. Sivuvirtoja myös käsiteltiin eri tavalla ja tehtaiden laiteko-
koonpanoissa oli eroja – esimerkiksi Äänekosken lietteet toimitettiin kokonaisuudessaan mädättämöön jatkokäsittelyä varten. Sivuvirtoja myös toimitetaan tehtaiden välillä erilaisiin hyötykäyttökohteisiin ja ravinteiden kierrätysosuuk-
sissa oli vaihtelua. Etenkin kuoren ja lietteiden energiatuo-
tanton toimitetuissa määrissä oli suuria eroja tehtaiden vä-
lillä. Fosforia päätyi kierrätykseen keskimäärin noin viides-

osa sellaisissa tehtaissa, joissa fosforia sisältäviä sivuvir-
toja poltettiin tehdasalueella. Tämä tulos on linjassa koko
Suomen metsäteollisuuden fosforitaseen kanssa.

Ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksia tuleekin aina tar-
kastella tapauskohtaisesti. Sivuvirtojen hyödynnettävyyttä
voi rajoittaa niiden koostumus tai haitta-ainesisältö ja pai-
kalliset olosuhteet ratkaisevat, milloin kierrätysmateriaalien
käytön lisääminen on kokonaisuutena kestävä.

6 Ravinnekädenjälki

Tämä selvitys keskittyi tarkastelemaan ravinnepitoisten sivuvirtojen hyötykäyttöä. On kuitenkin hyvä huomioida, että ravinnekädenjälkeen vaikuttaa myös prosessien ravinnetehokkuus. Esimerkiksi erilaiset tehdasympäristön sisäiset ravinnekierrat, joissa omien sivuvirtojen ravinteita käytetään prosesseissa hyväksi, vaikuttavat siihen kuinka paljon neitseellisiä tai kierrätettyjä luonnonvaroja tuotannossa tarvitaan. Mikäli halutaan laskea numeerisia ravinnekädenjälkilukuja, on laskelmissa huomioitava myös nämä ravinteiden tehokasta käyttöä edistävät tekijät ⁵(VTT Technology 2021).

Ravinteiden näkökulmasta sivuvirtojen hyötykäytössä oleellista on se, että ravinteet päätyvät hyötykäyttöön. Siten esimerkiksi maarakentamiseen päätyvät ravinnepitoiset sivuvirrat eivät kasvata ravinnekädenjälkeä, sillä tällöin ravinteita poistuu luonnon kiertokulusta ilman, että sivuvirran avulla korvataan neitseellisiä ravinteita. Toisaalta kaikki ravinnekierrat eivät kulje biologisten prosessien kautta. Esimerkiksi jos kalsiumia sisältävää viherliljeä käyte-
tään korvaamaan kalkkikiveä, ravinnekädenjälki kasvaa, sillä tällöin kalkkikiven sisältämä neitseellinen kalsium korvataan prosessissa kierrätettävällä kalsiumilla.

6.1 Ravinteiden kierrätyksen potentiaali ja haasteet

Kansallinen biotalousstrategia ohjaa myös metsäteollisuuden yrityksiä kohti kiertotaloutta, materiaalien mahdollisimman tehokasta hyödyntämistä sekä fossiilisten raaka-aineiden korvaamista biopohjaisilla vaihtoehdoilla. Suomen ravinnevision mukaisesti kierrätysravinteilla tulisi olla toimivat markkinat Suomessa vuoteen 2030 mennessä. Suomella tavoitteena onkin pyrkiä ravinnekierrätyksen mallimaaksi. Ravinteiden kierrätyksellä on yhtymäkohtia myös ilmastomuutoksen torjunnan kanssa. Kiertotalouden edistämishelmassa ehdotetaan tavoitteita luonnonvarojen käytölle sekä toimenpiteitä, joilla hiilineutraalista kiertotalousyhteiskunnasta tulee taloutemme kestävä perusta vuonna 2035.

Kiertotaloudessa ja ravinteiden kierrätyksessä EU-tason sääntelyllä on merkittävä rooli, koska sisämarkkinoilla tuotteiden ja palveluiden tulisi liikkua vapaasti. EU:ssa lainsäädännöllä pyritään luomaan markkinoita uusioraaka-aineille. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (Green Deal, 2019) on keskeinen toimenpidekokonaisuus, jolla ohjataan EU:ta kohti hiilineutraaliutta 2050 mennessä ja samalla edistetään kiertotaloutta. EU:n kiertotalouden toimintasuunnitelma ja useat direktiiviudistukset ovat osa pakettia.

Ympäristöministeriön Green Deal -sopimukset ovat vapaaehtoisia sopimuksia valtion ja elinkeinoelämän tai muun julkisen sektorin välillä ilmastomuutoksen hillitsemiseksi ja kiertotalouden edistämiseksi.

⁵ Vatanen, S. et al. 2021. The environmental handprint approach to assessing and communicating the positive environmental impacts. VTT Technology 392

EU:n jätesäädöspaketin toimeenpanemiseksi jätelain laaja uudistus tuli voimaan 19. heinäkuuta 2021. Uudistettavassa jätelaissa on mm. tarkennettu pelisääntöjä jätteeksi luokittelun päättämiseksi. Lannoitteiden kansallinen ja EU-maiden yhteinen omavaraisuus, huoltovarmuus sekä fosforivarantojen väheneminen ovat Suomessa ja Euroopassa nousseet tärkeiksi kriteereiksi erityisesti fosforin kierrätyksen kannalta. Koko Euroopassa on vain yksi fosforilannoitteen raaka-ainetta tuottava kaivos, ja se sijaitsee Siilinjärvellä. Muu fosforilannoitteiden raaka-aine tuodaan EU:n ulkopuolelta. Tuonti on keskittynyt pääasiassa kolmeen Pohjois-Afrikan maahan (Marokko, Tunisia ja Algeria) ja niistä vain Marokko on toistaiseksi ollut yhteiskunnallisesti stabiili maa. Muutamista Pohjois- ja Etelä-Amerikan maista on myös ostettavissa fosforilannoitteiden raaka-aineita, mutta toistaiseksi tuonti em. Pohjois-Afrikan maista on ollut hintatasoltaan edullisinta. Lainsäädännöllisen ohjauksen, teknologioiden kehittymisen ja kierrätysliiketoiminnan kehityksen myötä jätteiden ja sivumateriaalien hyödyntäminen lannoite- ja muussa käytössä lisääntyy samalla kun kaatopaikoille sijoitetaan entistä vähemmän materiaaleja. Entistä useammin kierrätysravinteet päätyvät takaisin luonnon kiertokulkuun ja korvaavat fossiilisia raaka-aineita.

EU:n lannoitevalmisteasetus (2019/2009), joka on tullut voimaan 14.7.2019 ja jonka soveltaminen alkaa 16.7.2022, yhdenmukaistaa sääntöjä, jotka koskevat louhituista ja kemiallisesti tuotetuista epäorgaanisista raaka-aineista valmistettuja ja uusioraaka-aineista valmistettuja orgaanisia lannoitevalmisteita. Asetuksen mukaiset tuotteet läpikäyvät vaatimustenmukaisuusarvioinnin, jonka jälkeen ne voidaan varustaa CE-merkinnällä. Asetus helpottaa merkittävästi kierrätysravinteiden kaupallista käyttöä. Tällä hetkellä Suomen markkinoille voi saattaa ja Suomeen tuoda ainoastaan sellaisia lannoitevalmisteita, joille löytyy tyyppinimi joko

kansallisesta lainsäädännöstä tai EU-lainsäädännöstä. Metsäteollisuuden sivuvirroista tuhkalta, meesakalkille, kalkkipölylle, kuitulietteelle, stabiloidulle lietteelle ja kuorelle on olemassa nykyisen lannoitevalmisteasetuksen mukaiset tyyppinimet. Tyyppinimet poistuvat uuden lannoitevalmisteasetuksen myötä ja jatkossa markkinoille saatettavien CE-merkittyjen lannoitevalmisteiden on täytettävä asetuksen vaatimukset.

Lainsäädäntöohjauksella on suuri merkitys ravinteiden kierrätyksen edistämisen kannalta EU:ssa ja kansallisesti. EU:n ja kansallisen tavoitekokonaisuuden ja lainsäädäntökehityksen tavoitteena on tukea ravinteiden kierrätystä ja kierrätysmarkkinoiden toimivuutta. TKI- ja ekosysteemitoinnalle sekä demonstraatio- ja laitosinvestoinneille suunnatut eri rahoitus- ja tukimuodot pyrkivät kannustamaan ravinteiden kierron tehostamiseen. Lainsäädäntöohjauksen tulee olla johdonmukaista, ennakoitavaa ja pitkäjänteistä, jotta toivottuja tuloksia saavutetaan. Yleisesti ottaen positiivisia kannustimia pidetään parempana kuin yrityksille lisäkustannuksia tuovia ohjauskeinoja. Kierrätysmateriaalien markkinoita tulee edelleen vahvistaa ja sivutuotteiden ja jätteiden hyötykäytön tulee olla lainsäädännöllisesti sujuvaa.

Metsäteollisuuden sivumateriaalien hyödyntäminen lannoitteena metsätaloudessa

Tyypillisellä turvemaalla puuntuotannossa on pulaa erityisesti fosforista ja kaliumista kun taas typen niukkuus on pääasiallinen rajoittava tekijä kivennäismailla. Metsäteollisuuden sivuvirroista erityisesti tuhkaa on käytetty lannoitefarkoituksessa sen sisältämien hyödyllisten ravinteiden vuoksi.

Nykyään tuhkaa suositellaan puuntuotannon lisäämiseksi erityisesti runsastyyppisten ja ojitettujen turvemaiden lannoitukseen, joiden rajoittavana tekijänä on kaliumin ja fosforin saatavuus. Metsäteollisuuden tuhka soveltuukin hyvin tähän käyttötarkoitukseen sen korkean fosfori- ja kaliumpitoisuuden vuoksi. Tuhkalannoituksen kasvua lisäävä pitkäaikainen vaikutus voi näkyä turvemaiden metsissä useiden vuosikymmenten ajan ja fosforin vaikutusaika voi olla parhaimmillaan jopa 50 vuotta. Lannoitteen tuhka liukenee maassa varsin hitaasti, mikä on juuri metsissä edullista, koska niiden lannoittaminen tapahtuu kustannussyistä verrattain harvoin (tyypillisesti 15–20 vuoden välein, monesti jopa tätäkin harvemmin). Hyvin kasvavat suopuustot sitovat hiiltä ja hillitsevät näin osaltaan ilmastomuutosta – metsäntutkimuslaitoksen tutkimuksen mukaan tuhkalannoitus voikin lisätä turvemaalla sijaitsevien metsien puuston vuotuista kasvua jopa 3 m³/ha.

Koska kangasmaiden kasvua rajoittava tekijä on yleensä typpi, tuhka ei sellaisenaan kelpaa niiden lannoiteaineeksi. Tuhkalannoitusta voidaan kuitenkin käyttää yhdessä typpilannoitteen kanssa, jolloin tutkimusten mukaan puiden kasvu lisääntyy enemmän verrattuna pelkkään typpilannoitukseen. Kangasmaiden tuhkalannoituksen vaikutus puuston kasvuun voi kuitenkin jäädä melko pieneksi, eikä tuhkalannoitus kangasmailla siten ole aina erityisen kannattavaa. Puuston kasvua on havaittu lähinnä vain kaikkein viljavimmilla kangasmailla. Sen sijaan tuhkaa voidaan käyttää kangasmailla kalkitusaineena – tuhka nostaa maaperän

pH:ta, jolloin maaperän haitallisten metallien liukeneminen ja kulkeutuminen esimerkiksi vesistöihin vähenee.³

Tapion, Suomen metsäkeskuksen ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun yhteisessä ”Vastuullista liiketoimintaa tuhka” -hankkeen (2019–2021) tavoitteena on ollut lisätä tuhkan käyttöä metsänlannoitteena ja metsäautoteiden rakennusmateriaalina ja löytää uusia liiketoimintamahdollisuuksia tuhkan käytölle. Hankkeessa on laadittu ”Tuhka osana kestäväää liiketoimintaa” -opas⁶, johon on koottu keskeisin tuhkaan liittyvä tietous, ja jota tuhkan tuottajat ja käyttäjät voivat hyödyntää toiminnassaan. Oppaassa on keskitytty tuhkan hyötykäyttökohteista metsänlannoitukseen ja metsätien rakennukseen. Oppaassa käsitellään niin ikään tuhkan ominaisuuksia, laatua ja ympäristövaikutuksia.

Myös metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla syntyviä lietteitä voidaan käyttää metsälannoitteina. Lannoitekäyttöä varten lietteet tulee käsitellä ja stabiloida esimerkiksi mädättämällä ja kompostoimalla. Käsitellyt lietteet voidaan hyödyntää lannoiteaineena joko sellaisenaan tai sekoitettuna tuhkaan. Kalsiumpitoisia lietteitä voidaan myös hyödyntää kalkitusaineena happamilla mailla. Lietteiden lannoituskäyttö kohdistuu kuitenkin yleensä metsätalouden sijasta maatalouteen.

⁶ Arnkil, N., Joensuu, S., Kauppila, M., Kontinen, K. Kotiharju, A., Lahti, E. & Tenhola, T. 2020. Tuhka osana kestäväää liiketoimintaa – Opas tuh-

kan tuottajille ja käyttäjille. Tapion raportteja 42. Tapio Oy. <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/08/Tuhka-osana-kestavaa-liiketoimintaa-opas-Tapio-31082020.pdf>

***Metsäteollisuuden sivumateriaalien hyödyntäminen
lannoitteena ja maanparannuksessa maataloudessa***

Maataloussektori on suurin lannoitevalmisteiden kuluttaja. Maataloudessa käytetään erityisesti typpeä, fosforia ja kaliumia sisältäviä NPK-lannoitteita. Maataloussektori on myös vastuussa suuresta osasta typen ja fosforin vesistö-päästöistä. Maatalouden vesistökuormitus on pääasiassa hajakuormitusta, jonka hallinta on pistemäistä kuormitusta vaikeampaa ja osa maataloudessa käytetyistä uusiutumattomista ravinteista menetetään siten vesistöihin. Maatalouden ravinteiden tehokas kierrätys ja metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen voisikin vähentää uusiutumattomien ravinteiden tarvetta, parantaa vesistöjen tilaa ja synnyttää uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Puutuhka soveltuu metsälannoituksen lisäksi tiettyjen vaatimuksien täytyessä myös maatalouden lannoitteeksi ja maanparannusaineeksi. Tuhka sisältää runsaasti fosforia ja kaliumia, jotka ovat tärkeitä kasviravinteita. Tuhka ei kuitenkaan sisällä typpeä, mitä tulee tuhkalannoitteen ohella lisätä viljelysmaahan. Puuperäiset raskasmetallit (etenkin kadmium) päätyvät kuitenkin tuhkaan rajoittaen sen käyttöä sellaisenaan maatalouden lannoiteaineena. Koska tuhkan käyttöä halutaan kuitenkin laajentaa peltolannoitukseen maatalouden ravinteiden kierron tehostamiseksi, uusia erotustekniikkoja raskasmetallien poistamiseksi tuhkasta on kehitteillä.⁷ Lisäksi on huomioitava, että mikäli tuhkaa halutaan käyttää luomuviljelyssä, tulee sen olla Eviran hyväksymää ja peräisin sellaisesta puusta, jota ei ole kaatamisen

jälkeen käsitelty kemiallisesti. Esimerkiksi kemiallisesti käsitellyn puutähteen tai liimapuun ja lastulevyjen osien poltossa syntyvää tuhkaa ei voi käyttää luomuviljelyssä.

Kuitulietettä ja stabiloitua tai hygienisoitua biolietettä voidaan myös hyödyntää lannoitteina ja maanparannusaineena. Lisäämällä ravinnepitoista, runsaasti orgaanista aineesta sisältävää lietettä viljelysmaahan voidaan lannoituksen lisäksi parantaa maaperän fysikaalista ja biologista rakennetta ja siten kasvattaa pellon veden- ja ravinteiden pidätyskykyä. Mikäli lietteet poltetaan tuhkakksi, menetetään peltoviljelyssä tärkeä orgaanisen hiilen lähde, vaikka tuhkassa fosfori, kalium ja kalsium ovatkin saatavilla.

Lietteiden sisältämien haitta-aineiden määrään voidaan vaikuttaa lietteen käsittelytavalla. Stabiloinnilla ja hygienisoinnilla tarkoitetaan lietteen käsittelyä lannoitteeksi soveltuvampaan muotoon esimerkiksi mädättämällä, kompostoimalla tai kuivaamalla.

Suomalainen peltomaa on luonnollisesti melko hapanta. Maan happamuuden säätöön sopivia maanparannusaineita kutsutaan kalkitusaineiksi. Maanparannus- ja kalkitusaineiden käytöllä pyritään nostamaan ja ylläpitämään maaperän pH:ta ja muokkaamaan maan rakennetta paremmaksi. Puuperäinen tuhka sisältää paljon kalsiumia ja soveltuu siten lannoitekäytön ohella myös peltokalkitukseen. Myös kalsiumpitoisia lietteitä voidaan hyödyntää kalkitusaineina. Vaikka tuhka ja tuhka johdannaiset kalkitusaineet eivät välttämättä pärjää kustannusvertailussa tavallisempia kalkitusaineita vastaan kalkitusvaikutuksen osalta, tuhkan etuna on sen sisältämät ravinteet ja hivenravinteet. Tuhkaa

⁷ Gango, A. & Kuokkanen, E. 2018. Biopohjaisen lentotuhkan hyötykäyttö lannoitteena. Erotustekniikan tutkimuskeskus- hankkeen loppuraportti. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

sisältävän kalkitusaineen mukana peltoon joutuu kuitenkin myös puun sisältämiä raskasmetalleja. Tuhkan kuljetustäisyyksillä ja -kustannuksilla on myös suuri merkitys sen hintaan ja käytön kannattavuuteen.

Myös muita metsäteollisuuden sivuvirtoja voidaan käyttää maanparannus- ja kalkitusaineina. Meesakalkkia ja kalkkipölyä voidaan käyttää maataloudessa rakennekalkkina parantamaan maaperän viljelykuntoa ja vähentämään fosforin huuhtoutumista vesistöihin. Rakennekalkki soveltuu parhaiten savimaiden kalkitukseen, joiden vedenläpäisevyyttä ja rakennetta se parantaa. Apilan ravinneseelvityksen mukaan meesakalkin neutralointikyky on 20 % ja meesatuhkan/kalkkipölyn 35 %.

Sivuvirtapohjaiset lannoitteet voivat vaikuttaa kokonaisvaltaisesti maaperään. Esimerkiksi ravinnekuidussa ja puhdistamolieteteissä on merkittävä määrä orgaanista ainetta, mikä muuttaa maaperän orgaanisen aineen määrää edullisempaan suuntaan ja edelleen vaikuttaa myönteisesti maaperän fysikaalisiin ja biologisiin ominaisuuksiin⁸.

Muu ravinteiden kierrätys

Volyymiltään ja ravinnesisällöltään metsäteollisuuden merkittävin sivuvirta on puun kuori. Kuoren hyötykäytön lisääminen esimerkiksi viherrakentamisessa tai kompostin tukiaineena olisi potentiaalisin reitti lisätä ravinteiden kierrätystä typen osalta. Viherrakentamisessa kuorikate parantaa sadeveden imeytymistä kasvien juuriston käyttöön, suojaa maanpintaa kuivumiselta ja eroosiolta sekä parantaa hyödyllisten pieneliöiden elinolosuhteita. Kompostoinnissa se

lisää rakenteen ilmatilaa ja tasapainottaa ravinnekoostumusta. Kuori on kuitenkin metsäteollisuuden tärkein biopolttoaine, jonka korvaaminen jollakin tehtaan ulkopuolelta tulevalla polttoaineella ei ole välttämättä kustannustehokasta tai kestävä.

Viherlipeäsakka on yksi metsäteollisuuden vaikeimmin hyödynnettäviä sivuvirtoja. Vaikka viherlipeäsakalle kehitetään jatkuvasti uusia hyötykäyttökohteita, sen sisältämien ravinteiden uusiokäyttö on yhä hankalaa. Viherlipeäskan hyödyntämistä lannoitteena on tutkittu, mutta se sisältää maanviljelyssä hyödyllisten aineiden lisäksi runsaasti haitallisia ainesosia kuten puusta peräisin olevaa kadmiumia. Sen sijaan kalkkikiven korvaajana savukaasujen puhdistuksessa viherlipeäsakkaa on kokeiltu. UPM:n kokeilussa viherlipeäskan todettiin vähentävän esimerkiksi kivihiilen poltossa syntyviä rikkipäästöjä yhtä hyvin kuin kalkkikivi. Kalkkikiven korvaaminen viherlipeäsakalla on myös edullisempaa ja ilmastoystävällisempää, sillä kalkkikivi tuodaan ulkomailta. Savukaasujen puhdistukselle ei kuitenkaan tule enää olemaan tarvetta, kun kivihiilen poltto tulevaisuudessa lopetetaan. Viherlipeäskan soveltuvuutta betonia korvaavan rakennusmateriaalin ja keinokivien valmistuksessa myös tutkitaan. Toistaiseksi viherlipeäsakka ei kuitenkaan ole ravinnekierrätyksen kannalta arvokas sivuvirta.

Uusilla toimintatavoilla ja innovaatioilla on keskeinen rooli kierrätyspotentiaalin valjastamisessa. Ravinteiden kierron ja kierrätysasteen seuraaminen, tekeminen näkyväksi ja toimenpiteiden kohdistaminen oikein ravinteiden kierron

⁸ Metsäteollisuuden sivuvirroista valmistettavien lannoitetuotteiden markkinat, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139085/Lehtovaara_Olli.pdf?sequence=1&isAllowed=y

edelleen kehittämiseksi ja tehostamiseksi on tärkeää oikean kehityssuunnan löytämiseksi. Kiertotaloutta tukevilla digitaalisilla ratkaisuilla kuten kiertotaloudelle tärkeän datan määrittelyllä, keräämisellä ja avaamisella on suuri merkitys kiertotalouden mahdollistajana.

Metsäteollisuuden tuotteiden globaalit markkinat kasvavat ja uusilla innovatiivisilla tuotteilla on entistä suurempi rooli. Tulevaisuudessa uusiutuvista luonnonvaroista valmistetut materiaalit ja tuotteet ovat entistä keskeisempiä kiertotalouden toteuttamisessa. Ravinteiden kierron kannalta useimmilla näistä tuotteista ei kuitenkaan ole kovin isoa merkitystä – esimerkiksi bioetanoli tai sellu eivät sisällä merkittäviä määriä ravinteita. Sen sijaan uudenlaiset puupohjaiset ratkaisut tarjoavat ratkaisuja ilmastonmuutoksen torjuntaan ja voivat korvata materiaaleja, joiden tuotantoon liittyy merkittäviä kestävyysvaasteita (esimerkiksi bioetanoli polttoaineena tai selluloosapohjaiset kuidut puuvillan ja viskoosin korvaajana). Mikro- ja nanoselluloosapohjaisilla aineilla voidaan tosin poistaa useita vedessä olevia haitta-aineita ml. ravinteita ja siten vaikuttaa positiivisesti metsäteollisuuden ravinnekädenjälkeen.

Kiinnostus pyrolyysillä eli kuivatislauksella orgaanisista sivumateriaaleista valmistettavaa biohiiltä kohtaan on kasvanut viime vuosina. Pyrolyysi menetelmänä soveltuu hyvin metsäteollisuuden eri sivuvirtojen käsittelyyn. Biohiilellä on lukuisia korkean jalostusarvon tuotesovelluksia liittyen mm. veden ja ilmanpuhdistukseen, ravintoon, kosmetiikkaan ja muihin vastaaviin tuotteisiin, joissa biohiili korvaa fossiilisia materiaaleja. Biohiiltä voidaan esimerkiksi käyttää kasvu-alustoissa, joissa sen sisältämät ravinteet päätyvät lopulta takaisin luonnon kiertokulkuun.

Ravinteiden kierrätyksen haasteet

Metsäteollisuuden sivuvirtojen ravinteiden kierrätykseen liittyy myös erilaisia haasteita. Keskeinen haaste on löytää sellaisia ratkaisuja, jotka ovat kokonaisuutena kestäviä, eivätkä johda taloudellisesti tai ympäristön kannalta epäedullisiin kokonaisratkaisuihin. Yksistään ympäristön kannalta kaan ratkaisujen vertailu ei ole yksiselitteistä, koska erilaisia ympäristöhyötyjä ei voida helposti yhteismitallistaa. Yksi ratkaisu voi korvata neitseellisiä luonnonvaroja toisen hili- tessä ilmastonmuutosta. Lisäksi paikalliset erot taloudelli- sesti ja ympäristön kannalta voivat olla suuria.

Lannoitteiden loppukäyttäjien kannalta tärkeää on lannoite- ten turvallisuus, jatkuva saatavuus, edullisuus, ympäris- töystävällisyys ja niiden vaikutukset maaperän kasvukun- toon. Sivuvirtapohjaisten lannoitteiden jatkuva saatavuus voi olla neitseellisiin lannoitteisiin verrattuna epävarmaa ja niissä voi esiintyä laadullista vaihtelua.

Lainsäädäntö ohjaa Suomessa käytettäviä lannoitevalmis- teita, ja jotta sivuvirtaa voidaan hyödyntää lannoitevalmis- teena, pitää sillä olla tyyppinimi ja sen on täytettävä yleiset laatu- ja turvallisuusvaatimukset. Tyyppinimet poistuvat uu- den lannoitevalmisteasetuksen myötä ja jatkossa markki- noille saatettavien CE-merkittyjen lannoitevalmisteiden on täytettävät asetuksen vaatimukset.

Lannoitevalmisteen tulee täyttää muun muassa haitallisten metallien enimmäispitoisuudet ja hygieniavaatimukset. Lannoitevalmisteiden käytöstä ei saa aiheutua kasvi- ja eläintautien leviämisen tai ympäristön pilaantumisen vaa- raa. Metsäteollisuuden sivuvirtojen koostumus usein vaih- telee ja ne sisältävät ravinteiden ohella myös puuperäisiä raskasmetalleja, jotka voivat rajoittaa niiden hyödynnettä- vyyttä. Esimerkiksi kaikki tuhkat eivät laadullisesti täytä

kaikkia lannoitekäytön kriteerejä. Sivuvirtojen kustannustehokkuus voi myös olla heikkoa, mikäli sivuvirtaa tulee käsitellä runsaasti ennen kuin se on hyödynnettävissä muodossa.

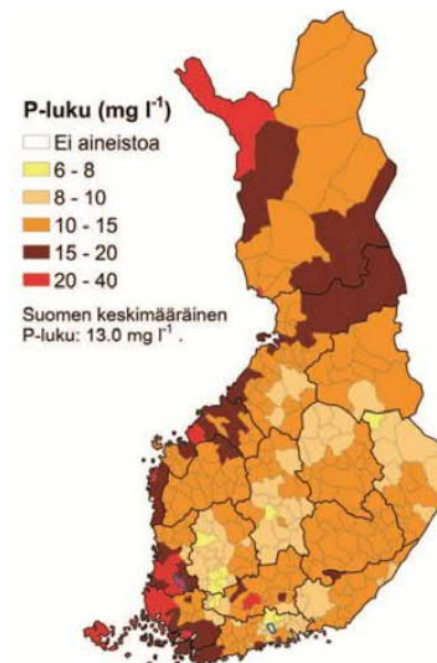
Sivutuotteiden ja jätteiden hyötykäyttö esimerkiksi lannoitteena tulisi olla riittävän yksinkertaista. Tapauskohtaisen sivutuotteeksi luokittelun ja jätteeksi päättymisen luokittelun tulisi olla mahdollista ja se voisi olla nykykäytäntöäkin helpompaa.

Kuori hyödynnetään nykyään lähes kokonaisuudessaan energiahyötykäytössä. Vaikka kuorelle on myös muita hyötykäyttökohteita, tehtaan oma energiantarve rajoittaa tehtaan ulkopuolelle toimitettavan kuoren määrää. Kuoren kuljettaminen pitkiä matkoja ei myöskään ole taloudellisesti eikä ympäristön kannalta järkevää.

Ravinteiden kierrätyksessä on varmistettava, että kierrätysmateriaalien käytön lisääminen on kokonaisuutena ympäristöllisesti kestävä, eikä johda ympäristön kannalta epäedullisiin raaka-ainevirtoihin esimerkiksi pitkien kuljetusmatkojen vuoksi. Ravinteiden alueellinen tarve ja kysyntä eivät välttämättä vastaa tuotantoa. Alueelliset erot lannoitustarpeessa ovat suuria. Ne johtuvat pääosin kotieläin- ja viljantuotannon painottumisesta eri alueille. Pitkät kuljetusetäisyydet lisäävät myös kustannuksia. Peltojen P-lukujen keskiarvot Suomen kunnissa vuosina 2005–2009 on esitetty kuvassa 24. Kuvan kartasta on nähtävissä, että etenkin länsirannikolla ja Pohjois-Suomessa fosforia on yli

tarpeen, kun taas Itä- ja Keski-Suomessa fosforista on pulaa kasvinravinteena.

Kunnilla ja alueilla on merkittävä rooli kiertotaloutta tukevien palveluiden ja ratkaisujen suunnittelussa ja edistämässä yhdessä alueen toimijoiden ja yritysten kanssa. Niillä on merkittävä rooli muun muassa kiertotaloutta tukevien toimijaverkostojen ja -ekosysteemien mahdollistamisessa.



Kuva 24. Peltojen P-lukujen keskiarvot eri kunnissa vuosina 2005–2009 analysoiduissa maaperänäytteissä.⁹

⁹ Taustaselvitys - Lannan ja orgaanisten lannoitevalmisteiden ravinteiden kierrätyksen valtakunnallinen hanke; Loppuraportti 19.9.2014, Kristiina Mikkola Consulting & Fiant Consulting Oy

Metsäteollisuuden tuotteiden globaalit markkinat kasvavat ja uusilla tuotteilla on entistä suurempi rooli. Uudenlaiset puupohjaiset ratkaisut tarjoavat paitsi merkittävää liiketoimintapotentiaalia ja ratkaisuja erityisesti ilmastonmuutoksen torjuntaan ne voivat myös korvata materiaaleja, joiden tuotantoon liittyy merkittäviä kestävyysaasteita. Biopolttoaineet samoin kuin selluloosapohjaiset tekstiilikuidut, biologisesti hajoavat pakkausmateriaalit, kalvot ja biokomposiitit voivat monissa tapauksissa korvata ympäristöä kuluttavia raaka-aineita uusiutuvilla ja kestävästi tuotetuilla vaihtoehdoilla¹⁰. Nanosellusta voidaan tehdä nanopaperipohjaisia sensoreita, taipuisia elektrodeja ja sähköä johtavia liimoja.

Useimmilla uusista innovaatioista ei kuitenkaan ole suurta merkitystä ravinnekiertoihin tai metsäteollisuuden tehdasprosessien ravinnekädenjälkeen, eikä niitä ole siten tarkasteltu lähemmin. Mikro- ja nanoselluloosapohjaisilla aineilla tosin voidaan poistaa useita vedessä olevia haitta-aineita ml. ravinteita.

Kiinnostus pyrolyysillä eli kuivatislauksella valmistettavaa biohiiltä kohtaan on kasvanut. Pyrolyysi menetelmänä soveltuu hyvin eri metsäteollisuuden sivuvirtojen käsittelyyn. Biohiiltä voidaan esimerkiksi käyttää kasvualustoissa. Biohiili soveltuukin erinomaisesti kasvualustaksi tai kasvualustaisäksi tuomaan kuohkeutta sekä veden ja ravinteiden pidätyskykyä sen huokoisen, kennomaisen rakenteensa ansiosta. Kasvualustana sen sisältämät ravinteet päätyvät lopulta takaisin luonnon kiertokulkuun. Biohiilellä on myös lukuisia muita korkean jalostusarvon tuotesovelluksia liittyen

mm. veden ja ilmanpuhdistukseen, ravintoon, kosmetiikkaan ja muihin vastaaviin tuotteisiin, joissa biohiili korvaa fossiilisia materiaaleja.

Suomessa biohiiltä tuottaa esimerkiksi Tamperelainen Carbofex lähinnä metsätalouden PEFC-sertifioituista raaka-aineista. Laitos on hiilinegatiivinen ja sitoo jopa 2500 tonnia hiilidioksidia ilmakehästä vuodessa. Laitos on luokassaan Suomen ainoa ja Pohjoismaiden suurin.

6.2 Suomalaisia esimerkkejä ravinteiden kierrätyksestä

Suomalaisesta metsäteollisuudesta löytyy paljon hyviä esimerkkejä ravinteiden kierrätyksestä. Ravinteiden kierrätys säästää neitseellisiä luonnonvaroja ja luo usein myös täysin uudenlaista liiketoimintaa. Lisäksi monet tehdasympäristöt ovat tehostaneet prosessejaan ja löytäneet kustannustehokkaita tapoja hyödyntää omia ravinnepitoisia sivuvirtojaan.

Soilfood Oy – metsäteollisuuden sivuvirtoja maatalouden käyttöön

Vuonna 2015 perustettu kiertotalousyrittäjä Soilfood Oy jalostaa mm. metsäteollisuuden kuitu- ja ravinnepitoisia sivuvirtoja sekä kalkkeja ja tuhkaa maatalouskäyttöön lannoitteiksi sekä maanparannusaineiksi. Soilfoodin toiminta kattaa koko Suomen, ja yritys onkin useiden metsäyhtiöiden yhteistyökumppani sivuvirtojen hyödyntämisessä. Metsäteollisuuden sivuvirroista Soilfood hyödyntää tuotteissaan

¹⁰ Sellu Uusiutuva innovaatioiden sampo, Metsäteollisuus ry, 2019, <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/sellu-uusiutuva-innovaatioiden-sampo>

kuitupitoisia lietteitä eli kuitulietettä ja sekalietettä, erilaisia kalkkeja; meesaa, poltettua kalkkia ja kalkkipölyä sekä lentotuhkaa, pohjatuhkaa ja kuorihiekkaa.

Soilfoodin maatalousasiakkaille on tarjolla metsäteollisuuden sivuvirroista jalostettuja kalkkeja, lannoitteita ja maanparannuskuituja. Osa tuotteista sopii luomuviljelyyn tavanomaisen viljelyn lisäksi. Kalkkeja ja maanparannuskuituja on saatavana paitsi ravinnepitoisina tuotteina myös ilman typpeä, fosforia ja kaliumia. Maan ravinnepitoisuutta lisäävien tuotteiden lisäksi maanviljelyssä tarvitaan maanparannustuotteita, joissa erityisesti fosforin määrä on oltava olematon tai hyvin vähäinen. Näitä tuotteita käytetään silloin, kun peltomaan fosforipitoisuudet ovat jo korkeat, mutta maan rakennetta ja/tai happamuutta täytyy parantaa. Metsäteollisuuden sivuvirroista tähän tarkoitukseen materiaaliksi sopii erityisesti vähäravinteinen kuitu, jolla saadaan lisättyä viljelymaan orgaanista ainesta ilman että peltomaan ravinnepitoisuus nousee liikaa.

Sellutehtaiden kalkit soveltuvat hyvin lannoite- ja kalkitsemiskäyttöön, sillä prosessissa kalkkiin kertyy runsaasti fosforia. Kuitu- ja sekalietteet puolestaan sisältävät typen ja fosforin lisäksi orgaanista ainesta, joka lisää maan multavuutta, parantaa pellon veden- ja ravinteidenpidätyskykyä sekä mikrobiologista aktiivisuutta. Maan kasvukyky on peltoviljelyn ravinnekierron ja pellon valumavesien ravinnepitoisuuksien kannalta erittäin tärkeä ominaisuus. Soilfoodin maanparannuskuitujen ravinnehuuhtoumaa vähentävä vaikutus on vuonna 2015 aloitetun kenttäkokeen perusteella

todettu merkittäväksi ja niiden käyttäminen on tehokas ja kilpailukykyinen vesiensuojelukeino¹¹.



Kuva 25. Soilfood Oy, maanparannuskuitua.

UPM Kaukas ja Kekkilä Recycling Joutseno

UPM Kaukaan tehdasympäristön biologinen aerobinen jätevedenpuhdistamo hyödyntää Kekkilä Recycling Joutsenon kompostointilaitoksen typpipitoista rejektivettä kierrätysravinteena. Kekkilä Recycling Joutsenon kompostointilaitoksella tuotetaan maanparannuskompostia ja tuorekompostia. Rejektivettä syntyy, kun laitoksen kolmestatoista kompostointitunnelista johdetaan ammoniakkipesurin ja biosuodattimen kautta ulos kosteaa poistoilmaa. Kosteus

¹¹ Rasa, K., Pennanen, T.; Peltoniemi, K., Velmala, S., Fritze, H., Kaseva, J., Joona, J. & Uusitalo, R. 2021. Pulp and Paper Mill Sludges

Decrease Soil Erodibility. Journal of environmental quality. 50: 172–184. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20170>

tiivistyy rejekti- tai pesurivedeksi, joka ohjataan säiliöön ja täyttyttyään toimitetaan UPM Kaukaan jätevedenpuhdistamon käyttöön. Toisissa teollisissa prosesseissa syntyvä jätevesi on ravinnerikasta, ei ravinneriköyhää, kuten metsäteollisuudessa. Mikäli ravinnerikkaita jätevesiä ei tällä tavoin hyödynnettäisi, kuormittaisivat ne jätevedenpuhdistuslaitoksia.

Kekkilän rejektivesi soveltuukin hyvin jätevedenpuhdistamon typpiravinteeksi, koska prosessissa syntyvässä ammoniumsulfatissa typpi on ammonium-muodossa, joka on jätevedenpuhdistamon mikrobeille mieluisin typen muoto. Kompostointilaitoksen rejektivesiä on hyödynnetty jätevedenpuhdistamon ravinnelähteenä vuoden 2019 alusta, ja niillä on pystytty korvaamaan noin kolmannes puhdistamolla käytetystä typpiravinteesta. Kuukausittain tämä tarkoittaa noin 3,7 tonnin säästöä uusiutumattomissa ravinteissa.

Kekkilän kompostointilaitos sijaitsee vain viidentoista kilometrin päässä Kaukaan tehdasympäristöstä. Lyhyt välimatka on etenkin nesteaineksen kuljetuksessa olennaista – pitkillä välimatkoilla menetetään kierrätysravinteiden ilmastohyöty. UPM:llä painotetaan lähikierrätysravinteiden käyttöä yrityksen kierrätysravinnetavoitteessa.



Kuva 26. Kekkilä Recycling Joutsenon kompostointilaitos, UPM

UPM Plywood ja hautomokuori

UPM Plywood on kehittänyt yhdessä ProAgria Etelä-Savon ja Luonnonvarakeskuksen kanssa vanerin valmistuksen sivuvirrasta hautomokuoresta uuden maanparannusaineen, jolla voidaan parantaa peltomaata. Hautomokuorta syntyy, kun vanerin raaka-aineena käytettävistä tukeista irtoaa vesihaudonnassa kuorta ja maa-ainesta, jotka vajoavat hautomoaltaan pohjalle. Maanparannusaine on valmistettu sekoittamalla UPM Pelloksen vaneritehtaiden hautomokuorta ja Järvi-Suomen Voiman voimalaitoksen pohjatuhkaa. Hautomokuoresta valmistetulla maanparannusaineella on Ruokaviraston hyväksyntä ja se sopii peltoviljelyyn, luomuviljelyyn ja viherrakentamiseen. Hautomokuori on myös helppo levittää tavallisella kuivalannan levittimellä. Ensimmäinen erä tuli markkinoille kesällä 2019.

Hautomokuori voi maanparannusaineena edistää myös peltujen hiilensidontaa ja hillitä siten ilmastonmuutosta.

Maaperän ravinnepitoisuuden ja koostumuksen parantuksessa myös saadun sadon ja kasvien biomassan määrä lisääntyy, jolloin hiilen sidonta ilmakehästä tehostuu.



Kuva 27. Hautomoaltaan pohjalta kaupalliseksi maanparannusaineksi, UPM.

Rejektivesien käyttö metsäteollisuuden aktiivilietelaitosten typpiravinteena ja jätevesien yhteispuhdistamot

Metsäteollisuuden jätevedet käsitellään yleensä biologisella jätevedenpuhdistamolla aktiivilietemenetelmällä. Jätevedenpuhdistamolla syntyvät lietteet voidaan edelleen johtaa mädättämöön, jossa liete käsitellään anaerobisesti eli mädätetään. Mädätyksessä lietteen orgaaninen aines hajoo metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Metaania voidaan hyödyntää energiana. Mädätyksessä syntyy lisäksi mädätysjäännöstä, joka sisältää samat ravinteet kuin mädättämöön johdettu liete. Mädätysjäännöksestä voidaan separoida nesteosa (rejektivesi) ja kuivaosa erilleen. Rejektivesi sisältää edelleen runsaasti orgaanista ainesta ja typpeä. Rejektiveden ravinnepitoisuus ja laatu vaihtelevat suuresti mädättämön raaka-aineista riippuen. Rejektivettä voidaan käyttää jätevedenpuhdistamolla typen lähteenä ja vähentää

siten uusiutumattomien ravinteiden kuten urean ja fosforihapon, käyttöä.

Rejektivesien käyttöä jätevedenpuhdistamon ravinnelähteenä on kokeiltu useilla tuotantolaitoksilla. Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaalla menetelmä on jäänyt käyttöön; tehdasalueen mädättämön rejektivesi johdetaan takaisin jätevedenpuhdistamolle, jossa sillä korvataan typpiravinteita. Jätevedenpuhdistamolla oli jo ympäristölupavaiheessa suunniteltu käytettävän mädättämön rejektivesiä. Rejektivesien hyödyntäminen on lisäksi käytössä ainakin Stora Enso Oyj:n Varkauden kartonkitehtaan jätevedenpuhdistamolla ja UPM-Kymmene Rauman yhteispuhdistamolla, jossa hyödynnetään Gasumin Vehmaan biokaasulaitoksen ravinnekoncentraattia.

Rejektivesien käyttöön liittyy myös haasteita. Koeajoissa on havaittu muun muassa ongelmia lietteen laskeutumisessa, jolloin jätevedenpuhdistamon puhdistusteho on heikentynyt. Rejektivesien käytön on myös arveltu johtaneen joissain tapauksissa päästöraja-arvojen ylittymiseen. Jotta rejektivesien hyötykäyttö olisi mahdollisimman tehokasta ja kannattavaa, tarvitaan jatkotutkimuksia ja tapauskohtaista tarkastelua. Rejektivesien laatu ja ravinnepitoisuus vaihtelevat suuresti ja laadun tasapainottaminen edistäisi rejektivesien käytettävyyttä ja myyntiä. Rejektivesi on myös hyvin vesipitoista, mistä syystä sen kuljettaminen kauas ei ole kustannustehokasta eikä ilmastoystävällistä ilman rejektiveden konsentroimista ennen kuljetusta. Rejektiveden konsentroiminen taas edellyttää monivaiheisia tekniikoita, kuten pH:n säätöä ja strippausta tai suodatusta kalvotekniikalla.

Teollisia entsyymejä valmistava Genencor Internationalin Jämsänkosken tehdas ja UPM-Kymmene tekevät yhteis-

työtä jätevesien käsittelyssä. Entsyymien valmistuksen jätevesi sisältää runsaasti ravinteita, kun metsäteollisuuden jätevesi on ravinneköyhää.

Viherlipeäsakan käyttö voimalaitosten savukaasujen puhdistuksessa

Viherlipeäsakan käytöllä voidaan korvata voimalaitosten savukaasujen puhdistuksessa käytettävää kalkkikiveä. Tällöin kalsium ei päädy ravinteiden kierrätykseen, mutta menetelmä vähentäisi neitseellisen kalsiumin käyttöä. Kalkkikivi on luonnonvara, jota tuodaan Suomeen ulkomaisilta kalkkikaivoksilta. Viherlipeäsakalla voidaan vähentää louhitun kalkkikiven käyttöä ja vähentää myös kalkkikiven kuljetuksesta aiheutuvia päästöjä – viherlipeäsakkaa saadaan kotimaisilta sellutehtailta. Viherlipeäsakan käyttö rikinpoistokemikaalina ei myöskään aiheuta fossiilista hiilidioksidipäästöjä kuten kalkkikivi.

Alholmens Kraft kokeili viherlipeäsakan käyttöä kalkkikiven korvikkeena vuosina 2010–2011. Viherlipeäsakan todettiin vähentävän kivihiilen poltossa syntyviä rikkipäästöjä yhtä hyvin kuin kalkkikivi. Koetoimintaraportissa todettiin, että viherlipeän käyttö savukaasun rikinpoistokemikaalina AK2-voimalassa on turvallista, kun syöttömäärä on 1 tonnia/tunti. Viherlipeäsakka otettiin voimalassa vakituisen käyttöön vuonna 2016. Viherlipeäsakan käytöllä ei ole myöskään havaittu olevan negatiivisia vaikutuksia esimerkiksi tuhkan laatuun ja hyötykäyttöpotentiaaliin.¹² Hyötykäyttö kuitenkin loppuu kivihiilen polton loppuessa.

¹² Aluehallintoviraston päätös 281/2019, LSSAVI/1394/2019

7 Johtopäätökset ja toimenpidesuosituks

Ravinnetaseet

Tehdasympäristökohtaisissa ravinnetaseissa oli nähtävissä, että ravinteiden kierrätys ja sivuvirtojen käsittelyprosessit vaihtelevat eri tehtaiden välillä, eikä vahvasti vakiintuneita toimintamalleja ole. Ravinteiden kierrätyksessä ta-pauskohtaisilla tekijöillä ja sivumateriaalien hyödynnettävyydellä paikallisesti on suuri merkitys. Tämä mahdollistaa myös matalan kynnyksen hyötykäyttökokeilut, joiden avulla voidaan löytää uusia ja tehokkaita keinoja valjastaa sivuvirtojen kierrätysravinnepotentiaali. Tehtaiden ja muiden toimijoiden välinen yhteistyö on välttämätöntä uusien hyötykäyttömenetelmien kehittämiseksi ja laaja-alaisen hyödyn-tämisen mahdollistamiseksi.

Metsäteollisuudessa puun kaikki osat hyödynnetään tarkasti ja lähes kaikki sivutuotteet hyödynnetään edelleen jat-koprosesseissa. Prosesseissa kiertävillä ravinteilla on kuitenkin nykyistä hyötykäyttöä enemmän kierrätyspotentiaa-lia. Vuonna 2019 metsäteollisuuden sivuvirtojen sisältä-mästä tyydestä vain pieni osa ja fosforista, kaliumista ja kal-siumista arviolta noin neljännes päätyi ravinnekierrätyk-seen.

Ravinnekädenjälki

Sivuvirtojen energiahyötykäytössä syntyvän tuhkan lannoite-käytön lisääminen on hyvä tapa tehostaa ravinteiden kier-rätystä, koska se sisältää runsaasti fosforia, kaliumia ja kal-siumia. Tuhka soveltuu erityisen hyvin lannoitekäyttöön tur-vemaalla sijaitsevilla metsillä, joiden kasvua rajoittaa fos-

fori ja kalium, ja joiden lannoittaminen tapahtuu kustannus-syistä harvoin. Tuhkalannoitus hillitsee ilmastomuutosta kiihdyttämällä puuston kasvua ja siten hiilensidontaa pit-källä aikavälillä - tuhkalannoituksen kasvua lisäävä vaiku-tus voi näkyä metsissä useiden vuosikymmenten ajan. Tuhka onkin metsäteollisuuden merkittävin fosforipitoinen sivuvirta ja koska fosfori on uusiutumaton luonnonvara, on sen kierrätys erityisen tärkeää.

Suurin osa sivuvirtojen sisältämästä tyydestä karkaa nyky-toimin ilmaan. Kuoren ja kuorihiekan hyötykäytön lisäämi-nen esimerkiksi viherrakentamisessa tai kompostin tukiai-neena on potentiaalisin reitti lisätä tyyden kierrätystä.

Myös muita sivuvirtoja, kuten lietteitä ja meesaa, voidaan hyödyntää lannoitteiden ja maanparannusaineiden valmis-tuksessa. Vaikeimmin hyödynnettävälle viherlipeäsakalle on kehitteillä innovatiivisia hyötykäyttötapoja.

Ravinteiden kierrätyksen haasteet ja mahdollisuudet

Uusilla toimintatavoilla ja innovaatioilla on keskeinen rooli kierrätyspotentiaalin valjastamisessa. Esimerkiksi mädättä-möiden ja kompostointilaitosten reaktiivisia on alettu käyt-tää metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla tyyden läh-teenä. Vastaavanlaisia ratkaisuja voidaan ottaa käyttöön myös muiden metsäteollisuuden tehtaiden jätevedenpuh-distamoilla ja vähentää siten neitseellisten ravinteiden li-säämistä puhdistusprosesseihin ja niiden vesistöpestöjä.

Lannoitteiden loppukäyttäjien kannalta tärkeää on lannoiteiden turvallisuus, jatkuva saatavuus, edullisuus, ympäris-töystävällisyys ja niiden vaikutukset maaperän kasvukun-toon. Sivuvirtapohjaisten lannoitteiden jatkuva saatavuus voi olla neitseellisiin lannoitteisiin verrattuna epävarmaa ja niissä voi esiintyä laadullista vaihtelua.

Kiertotaloutta tukevilla digitaalisilla ratkaisulla kuten kierto-
taloudelle tärkeän datan määrittelyllä, keräämisellä ja avaa-
misella on suuri merkitys kiertotalouden mahdollistajana.
Ravinteiden kierron ja kierrätysasteen seuraaminen, teke-
minen näkyväksi ja toimenpiteiden kohdistaminen oikein on
tärkeää toiminnan kehittämiseksi ja tehostamiseksi

Lainsäädäntöohjauksella on suuri merkitys ravinteiden kier-
rätyksen edistämisen kannalta EU:ssa ja kansallisesti.
Lainsäädäntöohjauksen tulee olla johdonmukaista, enna-
koitavaa ja pitkäjänteistä, jotta toivottuja tuloksia saavute-
taan. Yleisesti ottaen positiivisia kannustimia pidetään pa-
rempina kuin yrityksille lisäkustannuksia tuovia ohjauskei-
noja. Kierrätysmateriaalien markkinoita tulee edelleen vah-
vistaa, ja sivutuotteiden ja jätteiden hyötykäytön tulee olla
lainsäädännöllisesti sujuvaa – tästä esimerkkinä sivutuot-
teiden ja jätteiden lannoitekäyttö. Tapauskohtaisen sivu-
tuotteeksi tai jätteeksi luokittelun tulisi olla mahdollista ja se
voisi olla nykykäytäntöäkin helpompaa.

Ravinteiden kierrätyksessä on myös varmistettava, että
kierrätysmateriaalien käytön lisääminen on kokonaisuutena
ympäristöllisesti kestävä, eikä johda ympäristön kannalta
epäedullisiin raaka-ainevirtoihin esimerkiksi pitkien kulje-
tusmatkojen vuoksi. Ravinteiden alueellinen tarve ja ky-
syntä eivät välttämättä vastaa tuotantoa. Alueelliset
erot lannoitustarpeessa ovat suuria. Ne johtuvat pääosin
kotieläin- ja viljantuotannon painottumisesta eri alueille. Pit-
kät kuljetusetäisyydet lisäävät myös kustannuksia.

Kunnilla ja alueilla on tärkeä rooli kiertotaloutta tukevien
palveluiden ja ratkaisujen suunnittelussa ja edistämisessä
yhdessä alueen toimijoiden ja yritysten kanssa. Niillä on tär-
keä rooli muun muassa kiertotaloutta tukevien toimijaver-
kostojen ja -ekosysteemien mahdollistamisessa

Metsäteollisuuden tuotteiden globaalit markkinat kasvavat
ja uusilla tuotteilla on entistä suurempi rooli koko sektoria
ajatellen. Uudenlaiset puupohjaiset ratkaisut tarjoavat paitsi
merkittävää liiketoimintapotentiaalia ja ratkaisuja erityisesti
ilmastonmuutoksen torjuntaan ne voivat myös korvata ma-
teriaaleja, joiden tuotantoon liittyy merkittäviä kestä-
vyysaasteita. Puurakentamisen kasvattaminen on erin-
omainen keino lisätä kiertotalouden toteutumista rakenta-
misessa. Ravinteiden kierron kannalta useimmilla näistä
tuotteista ei kuitenkaan ole isoa merkitystä – esimerkiksi
biopolttoaineet tai sellu eivät sisällä merkittäviä määriä ra-
vinteita.

Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty toimenpidesuosituksia met-
säteollisuuden ravinteiden kierrätyksen lisäämiseksi.

Taulukko 4. Sivuvirtakohtaiset toimenpidesuosituksat metsäteollisuuden ravinteiden kierrättämispotentiaalin maksimoimiseksi.

Sivuvirta	Toimenpide	Potentiaali	Haasteet ja rajoitukset	Merkitys
Puutuhka	Käytön lisääminen metsä- ja pelto-lannoitteena	Tuhka soveltuu hyvin metsälannoitukseen. Erityisen hyvin se soveltuu runsastyyppisten ja ojitettujen turvemaiden lannoitukseen, joiden rajoittavana tekijänä on kaliumin ja fosforin saatavuus. Merkitys erityisesti fosforin kierrätyksen kannalta on suuri.	Tuhka voi sisältää puusta peräisin olevia raskasmetalleja (esim. kadmium), jotka voivat estää käytön peltoviljelyssä. Tuhka ei sisällä typpeä, eikä siten sovellu yksinään peltolannoitukseen. Erotustekniikoiden kehittyminen raskasmetallien ja muiden haitta-aineiden poistamiseksi tuhasta mahdollistaa entistä laajemman tuhkien hyötykäytön.	Suuri
Kuori ja kuorihiekka	Käytön lisääminen katemateriaalina, kompostin tukiaineena, viher-rakentamisessa ja kasvualustojen raaka-aineena.	Kuorikate parantaa sadeveden imeytymistä kasvien juuriston käyttöön, suojaa maanpin-taa kuivumiselta ja eroosiolta sekä parantaa hyödyllisten pieneliöiden elinolosuhteita. Ka-temateriaalina kuoren sisältämä typpi pääsee kiertoon.	Kuori on metsäteollisuuden oman bioenergi-antuotannon tärkein raaka-aine. Sen kuljetta-minen pitkiä matkoja ei myöskään ole kustan-nustehokasta eikä ilmastoystävällistä.	Kohtalainen
Jätevedenpuhdistamon liete	Käyttö lannoitteena, maanparan-nusaineena, viherrakentamisessa ja kasvualustojen raaka-aineena.	Lietteitä voidaan hyödyntää energianhyöty-käytön lisäksi myös monilla muilla tavoilla, jos ne stabiloidaan esimerkiksi mädättämällä tai kompostoimalla. Lisäämällä ravinnepitoista, runsaasti orgaanista ainesta sisältävää lietettä viljelymaahan voidaan lannoituksen lisäksi pa-rantaa maaperän fysikaalista ja biologista ra-kennetta ja siten kasvattaa pellon veden- ja ravinteiden pidätyskykyä.	Verrattuna maatalouspohjaisiin lietteisiin met-säteollisuuden lietteiden ravinnepitoisuus on vaatimaton. Lannoitekäytössä edellyttää yleensä stabilointia / hygienisointia ennen käyttöä. Tulee varmistaa, että täyttää lannoit-elainsäädännön vaatimukset.	Kohtalainen
Kuitu- ja pastaliete	Käyttö lannoitteena, maanparan-nusaineena ja kalkitusaineena. Yli-määräisen pastan kierrätys takai-sin prosessiin.	Pastaliete sisältää paljon kalsiumia ja sitä voi-daan hyötykäyttää maataloudessa. Pastapi-toisille vesille on kehitteillä käsittelymenetel-miä, joilla pasta voidaan kierrättää takaisin prosessiin (esimerkiksi ultrasuodatus ja dis-pergointi-menetelmä), jolloin neitseellisen kal-siumin tarve vähenee.	Kuitu- ja pastalietteiden ravinnepitoisuus on kalsiumia lukuun ottamatta usein vaatimaton. Lannoitekäytössä edellyttää yleensä stabiloi-nia / hygienisointia ennen käyttöä. Tulee var-mistaa, että täyttää lannoitelainsäädännön vaatimukset.	Kohtalainen

Sivuvirta	Toimenpide	Potentiaali	Haasteet ja rajoitukset	Merkitys
Meesa ja meesatuhka/kalkkipöly	Käyttö kalkitusaineena maanviljelyssä ja neitseellisen kalkin korvikkeena teollisuudessa.	Meesa sisältää paljon kalsiumia ja sillä voidaan korvata neitseellistä kalkkia ja erilaisia kalkitusaineita. Meesakalkkia ja kalkkipölyä voidaan käyttää maataloudessa rakennekalkkina parantamaan maaperän viljelykuntoa ja vähentämään fosforin huuhtoutumista vesistöihin. Rakennekalkki soveltuu parhaiten savimaille, joiden vedenläpäisevyyttä ja rakennetta se parantaa.	Meesakalkki ja kalkkipöly sisältävät jonkin verran raskasmetalleja, mutta pitoisuudet ovat yleensä alhaisia.	Kohtalainen
Kuitu/nollakuitu	Käyttö lannoitteena ja maanparannusaineena.	Nollakuitua voidaan levittää peltomaille. Kuitu vähentää maan liettymisherkkyttä, minkä seurauksena fosforipitoisen maa-aineksen kulkeutuminen vesistöihin vähenee.	Nollakuitu on niukkaravinteista ja vaatii yleensä lannoitekäytössä lisätyyppeä. Se hyödynnetään tällä hetkellä energiantuotannossa.	Kohtalainen
Kuitusavi	Poltetun kuitusaven lannoitus- ja maanparannuskäyttö	Poltettaessa kuitusaven kalsium konsentroiduu tuhkiin, joita voidaan käyttää lannoitus- ja maanparannuskäytössä.	Kuitusavi sisältää vähän ravinteita, lähinnä kalsiumia. Kuitusavi soveltuu sellaisenaan hyvin muihin tarkoituksiin kuten kaatopaikkarakentamiseen.	Vähäinen
Viherlipeäsakka	Käyttö kalkkikiven korvikkeena savukaasujen puhdistuksessa.	Viherlipeäsakalla voidaan korvata neitseellistä kalkkikiveä ja pienentää voimaloiden hiilijalanjälkeä.	Viherlipeäsakan käyttö kalkkikiven korvikkeena savukaasujen puhdistuksessa on rajoitettua ja vielä kokeiluvaiheessa samoin kuin käyttö rakennusmateriaalin ja keinokivien valmistuksessa. Savukaasujen puhdistuksessa kalsium ei päädy ravinteiden kierrätykseen, mutta se vähentää neitseellisen kalsiumin käyttöä. Hyötykäyttö myös loppuu kivihiilen polton loppuessa.	Vähäinen

Taulukko 5. Yleiset toimenpidesuositukset metsäteollisuuden sivuvirtojen ravinteiden kierrättämispotentiaalin käyttöönottoon.

Metsäteollisuuden osa-alue	Toimenpide	Potentiaali	Haasteet ja rajoitukset	Merkitys
Tutkimus ja kehitystointa	Uusien hyötykäyttömenetelmien kehittäminen esimerkiksi viherlipeäosakalle. Uusien tekniikkojen kehittäminen sivumateriaalien hyödynnettävyyden parantamiseksi, esimerkiksi raskasmetallien ja muiden haitta-aineiden poistamiseksi tuhka- ja lietteiden käsittelyyn.	Ravinteiden kierrätyksen lisääminen. Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrän pienentäminen. Tuhkan lannoitekäytön lisääntyminen maataloudessa.	Haasteena voi olla teknisesti, taloudellisesti ja ympäristön kannalta kokonaisedullisten uusien menetelmien löytäminen.	Suuri
Jätevedenpuhdistus	Jätevedenpuhdistamoille lisättyjen ravinteiden korvaaminen kierrätysravinteilla tai rejektivesien ravinteilla. Runsaasti ravinteita sisältävien jätevesien yhteispuhdistus metsäteollisuuden jätevesien kanssa.	Neitseellisten ravinteiden käytön ja jäteveden puhdistuksen tehokkuus.	Mahdollisuudet selvitettävä tapauskohtaisesti. Kokeiluissa on ollut haasteita rejektivesien laadun ja ravinnepitoisuuden vaihdellessa ja lietteiden laskeutumisessa, jolloin jätevedenpuhdistamon puhdistusteho on heikentynyt.	Kohtalainen
Lietteiden käsittely ja hyödyntäminen	Entistä monipuolisempi lietteiden hyödyntäminen esimerkiksi mädättämällä samalla hyödyntäen niiden energiasisältö. Myös uusia menetelmiä tutkitaan, kuten lietteiden käsittelyä HTC-märkähiiltoimenetelmällä.	Lietteiden lannoitekäytön lisääntyminen, tuotettujen sivutuotetuotteiden jalostusarvon kasvattaminen ja bioenergian tuotanto.	Haasteena ovat lietteiden laatu ja teknisesti, taloudellisesti ja ympäristön kannalta kokonaisedullisten uusien menetelmien löytäminen.	Kohtalainen

Metsäteollisuuden osa-alue	Toimenpide	Potentiaali	Haasteet ja rajoitukset	Merkitys
Koko metsäteollisuus	Raaka-aineiden ja sivuvirtojen ravinnepitoisuuksien ajantasainen seuraaminen ja ravinnekädenjäljen laskeminen huomioiden varsinaisen lannoitekäytön lisäksi muussa hyötykäytössä ravinteiden kierrätykseen päätyvät ravinteet, kuten maanparannuskäyttö.	Ravinteiden kierron ja kierrätysasteen seuraaminen, tekeminen näkyväksi ja toimenpiteiden kohdistaminen oikein ravinteiden kierron edelleen kehittämiseksi ja tehostamiseksi. Tätä työtä tehdään tälläkin hetkellä. Toimintatapoja voisi kuitenkin edelleen kehittää. Esimerkiksi tilastoinnissa maanparannuskäyttö kohdistetaan kategoriaan muu hyötykäyttö, josta vain osa on ravinteiden kierrätystä. Kiertotaloutta tukevilla digitaalisilla ratkaisuilla, kuten kiertotaloudelle tärkeän datan määrittelyllä, keräämisellä ja avaamisella on suuri merkitys kiertotalouden mahdollistajana.	Haasteena ovat sivuvirtojen epätasalaatuisuus ja ravinnepitoisuuksien vaihtelu.	Kohtalainen
Biohiilen valmistus	Kiinnostus pyrolyysillä eli kuivatislauksella orgaanisista sivumateriaaleista valmistettavaa biohiiltä kohtaan on kasvanut viime vuosina. Biohiiltä valmistetaan esimerkiksi metsätalouden puuperäisistä sivumateriaaleista ja se voisi soveltua hyvin myös metsäteollisuuden sivuvirtojen käsittelyyn.	Biohiilellä on lukuisia korkean jalostusarvon tuotesovelluksia liittyen mm. veden ja ilmanpuhdistukseen, ravintoon, kosmetiikkaan ja muihin vastaaviin tuotteisiin, joissa biohiili korvaa fossiilisia materiaaleja. Biohiiltä voidaan esimerkiksi käyttää kasvualustoissa, joissa sen sisältämät ravinteet päätyvät takaisin luonnon kiertokulkuun.	Metsäteollisuudessa sivutuotteille on muitakin soveltuvia käyttökohteita bioenergiantuotannosta biopolttoaineiden valmistukseen ja edellä kuvattuihin ravinteiden kierrätysratkaisuihin.	Vähäinen

Vahanen Environment Oy



Esa Salminen
Projektipäällikkö



Anne Liljendahl
Asiantuntija



Milja Vepsäläinen
Asiantuntija



Liina Marttila
Suunnittelija