



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 9/2015

Menetelmäkuvaus ravinnejalanjäljen laskemiseksi

Laskentaesimerkkinä elintarvikeketju

NUTS- hankkeen loppuraportti

Jenni Ypyä, Kaisa Grönman, Yrjö Virtanen, Pentti Seuri, Risto Soukka, Sirpa Kurppa

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 9/2015

Menetelmäkuvaus ravinne- jalanjäljen laskemiseksi

Laskentaesimerkinä elintarvikeketju

Nuts- hankkeen loppuraportti

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2015



ISBN: 978-952-326-008-5 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Verkkajulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-008-5>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Jenni Ypyä, Kaisa Grönman, Yrjö Virtanen, Pentti Seuri, Risto Soukka, Sirpa Kurppa

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2015

Julkaisuvuosi: 2015

Kannen kuva: Tapio Tuomela / Luke

Tiivistelmä

Jenni Ypyä¹⁾, Kaisa Grönman²⁾, Yrjö Virtanen¹⁾, Pentti Seuri¹⁾, Risto Soukka²⁾, Sirpa Kurppa¹⁾

¹⁾Luke; Uudet liiketoimintamahdollisuudet, 31600 Jokioinen, jenni.ypya@luke.fi, yrjo.virtanen@luke.fi, sirpa.kurppa@luke.fi, ¹⁾Luke; Luonnonvarat ja biotuotanto, 50100 Mikkeli, pentti.seuri@luke.fi,

²⁾LUT; Ympäristötekniikka, 53851 Lappeenranta, risto.soukka@lut.fi, kaisa.gronman@lut.fi

Typpi, fosfori ja kalium, ovat välttämättömiä ravinteita kaikelle turvatulle ruuantuotannolle ja elämiselle. Ihmistoiminnan seurauksena kuitenkin varsinkin typpeä ja fosforia on saatettu ravinnekiertoon liikaa, mikä näkyy tuotantoketjujen ravinnevuotojen vuoksi ravinnepäästöinä ja erilaisina ympäristövaikutuksina. Päästöjen lisäksi resurssien rajallisuus rasittaa ravinnetaloutta: fosforivarannot ovat hupenemassa ja reaktiivisen typen valmistaminen ilmakehästä kuluttaa runsaasti fossiilisia polttoaineita.

Jotta edellä oleviin ongelmiin voidaan puuttua yksittäisten tuotanto- ja kulutusketjujen hallinnan kautta, on ravinnevirtoja pystyttävä mittaamaan ja arvottamaan. Tässä työssä esitellään menetelmä ravinnejalanjäljen laskemiseksi. Ravinnejalanjäljellä pyritään mittaamaan erilaisten tuotanto- ja kulutusketjujen ravinteiden käytön tehokkuutta. Sillä tarkastellaan, kuinka paljon ketju ottaa käyttöön ravinnetta, ja kuinka paljon käyttöön otetusta ravinnemäärästä saadaan hyötykäyttöön, joko tarkasteltavaan tuotteeseen tai sivutuotteeseen tai muihin ravinteiden hyödyntävään hyödykkeeseen. Samalla tunnistetaan myös ketjun vuotokohtat: hukatut ravinteet voivat olla ravinnehaihtumia tai -huuhtoutumia, tai ravinteita, jotka päätyvät pitkäaikaiseen varastointiin tai jätteenä muuhun kuin ravinnehyötykäyttöön. Näiden luokitusten avulla lasketaan ravinnejalanjälki tarkasteltua toiminnallista yksikköä kohden: "Tuotetta varten otetaan käyttöön x kg ravinnetta (typpeä tai fosforia), josta hyödynnettiin tuotteessa y % ja kaikki hyötykäyttö huomioon ottaen z %."

Tässä työssä ravinnejalanjäljen laskeminen demonstroidaan kaurahiutaleelle ja kaurapuurolle tehdyn laskelman kautta. Raportissa on ohjeistettu ravinnejalanjäljen laskenta kussakin elinkaaren vaiheessa alkaen alkutuotannon panostuotannosta ja päättyen jätehuoltoon.

Laskelman tulokset osoittavat, että kaurahiutaleketju ottaa käyttöön elinkaarensa aikana 42 kg typpeä ja 7 kg fosforia. Tyydestä 55 % hyödynnettiin päätuotteessa, siis kaurahiutaleissa, ja kokonaisuudessaan, sivutuotteet huomioon ottaen, typen hyötykäyttöaste oli 71 %. Fosforista 55 % hyödynnettiin päätuotteessa ja kokonaisuudessaan fosforin hyötykäyttöaste oli 99 %. Selkeästi heikoimmat typen ja fosforin hyötykäyttöasteet (alle 50 %) ovat jäteveden käsittelyssä ja elintarvikejätteen käsittelyssä. Laskennan tuloksien perusteella voidaan sanoa, että eniten kehitettävää olisi erityisesti jätehuollossa.

Ravinnejalanjälki tarjoaa yksinkertaisessa ja vertailukelpoisessa muodossa tietoa ravinneresurssien kulutuksesta ja käytön tehokkuudesta. Siltä osin se on rinnasteinen vesijalanjäljen kanssa vaikkakaan ei ole ravinteiden suhteellista saatavuutta samalla tapaa huomioon kuin vesijalanjälki. Tehdyn laskelman perusteella voidaan todeta ravinnejalanjäljen osoittavan potentiaalia käyttökelpoisena menetelmänä kestävyden ympäristöllisen dimension tarkasteluun muiden LCA -pohjaisten menetelmien kuten ilmastomuutos- ja rehevöitymispotentiaalinen arvioinnin rinnalla. Ravinnejalanjäljen, hiilijalanjäljen, rehevöitymispotentiaalinen sekä lisäksi biodiversiteetin muutosta kuvaavan potentiaalinen ja ekotoksisen jalanjäljen arviointi antaisi yhdistettynä tuotevirran ja tuotteiden ekologisesta kestävydestä jo nykyistä paljon paremman kokonaiskuvan.

Ravinnejalanjälkeä voidaan soveltaa elintarvikkeiden tuotantotehokkuuden tarkasteluun, mikä on järkevää lannoite- ja ruuantuotannon vastatessa suurimmasta osasta ravinnevirroista, mutta myös se soveltuu myös muihin bioenergian ja biomateriaalien tuotantoketjujen tarkasteluun ja kehittämiseen.

Asiasanat:

Ravinnejalanjälki, hyödyntämisaste, neitseelliset ravinteet, kierrätysravinteet, elinkaaritarkastelu

Abstract

Nitrogen, phosphorus and potassium are necessary nutrients for all secure food production and all life. However, as a result of human activity, excessive amounts of nitrogen and phosphorus in particular have been introduced into the nutrient cycle, which, due to nutrient leakage from production chains, manifests itself in the form of nutrient emissions and different environmental impacts. In addition to emissions, the nutrient economy is burdened by the limited amount of resources available: the phosphorus resources are dwindling, and the manufacture of reactive nitrogen from the atmosphere requires large amounts of fossil fuels.

To be able to tackle the problems described above through management of individual production and consumption chains, it must be possible to quantify and evaluate nutrient flows. This study presents a method for calculating the nutrient footprint. The aim with using the nutrient footprint is to measure the efficiency of utilisation of nutrients in various production and consumption chains. It is used for examining how much nutrients each chain takes in, and how much of this intake of nutrients is utilised, either in the product under study or its by-product, or some other commodity making use of nutrients. At the same time, the leakage points along the chain are also identified: the nutrients can be lost through evaporation or leaching, or they may end up in long-term storage, or as waste without nutrient recovery. On the basis of these classifications, the nutrient footprint per functional unit under study is calculated: "For the product, a total of x kg of the nutrient (nitrogen or phosphorus) is taken to use, of which $y\%$ was utilised in the product, the total utilisation rate amounting to $z\%$ with all practical uses considered."

In this study, the calculation of the nutrient footprint is demonstrated by means of a calculation made for oatmeal and porridge. The report includes instructions for calculating the nutrient footprint in each phase of the life cycle, beginning from input production in primary production and ending with waste management.

The results of the calculation show that, during its life cycle, the oatmeal chain takes in 42 kg of nitrogen and 7 kg of phosphorus. 55% of the nitrogen was utilised in the main product, or oatmeal and, with the by-products considered, the total utilisation rate of nitrogen amounted to 71 %. 55% of the phosphorus was utilised in the main product, and the total utilisation rate of phosphorus was 99 %. Clearly the weakest utilisation rates of nitrogen and phosphorus (less than 50%) are achieved in sewage disposal and food waste treatment. On the basis of the results of this calculation, it could be stated that waste management is the sector with the most room for improvement.

The nutrient footprint offers information on the consumption and efficiency of utilisation of nutrient resources in a simple and comparable form. In that sense, it is comparable with the water footprint, even though it does not take account of the relative access to nutrients in the same manner as the water footprint. On the basis of the calculation made, it can be concluded that the nutrient footprint would seem to be a usable method for examining the environmental dimension of sustainability alongside other LCA-based methods, such as the assessment of the climate change potential and eutrophication potential. In addition, we would be able to obtain a much clearer overall image of the ecological sustainability of the product flows and the products if the assessments of the nutrient footprint, the carbon footprint, and the eutrophication potential, as well as the ecotoxicity footprint and the potential describing the biodiversity change were combined.

The nutrient footprint can be applied to the study of the production efficiency of food products, which is rational since feed and food production is responsible for the main part of nutrient flows, but it is also suited for the examination and development of other production chains for bioenergy and biomaterials.

Keywords: Nutrient footprint; utilisation rate; virgin nutrients; recycled nutrients; life cycle assessment

Alkusanat

Tämä raportti on osa tutkimushanketta ”NUTS - Suomi kestävän ravinnetalouden mallimaaksi”, jonka puitteissa rakennetaan kestävää ravinnetaloutta yhteistyössä eri toimialojen kesken. NUTS -projekti on kolmivuotinen (2012–2014) hanke, joka on osa Tekesin Tie kestävään talouteen ohjelmaa. Hankkeen toteuttajina toimivat Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT) ja Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT) nyttemmin Luonnonvarakeskus (LUKE).

Hankkeen yhteistyökumppaneina ja rahoittajina toimivat seuraavat tahot: Tekes, Baltic Sea Action Group (BSAG), Biomeri Oy, Biovakka Suomi Oy, Fortum Oyj, HK Agri Oy, maa- ja metsätalousministeriö, Outotec Oyj, Raisio Oyj ja Yara Suomi Oy.

Tässä osaprojektissa oli tavoitteena kehittää uusi työkalu, ravinnejalanjälki, mittaamaan tuotteiden ravinteiden kulutusta ja ravinteiden käytön tehokkuutta. Tässä raportissa Ravinnejalanjälki kuvataan ravinnejalanjälki menetelmänä, ja annetaan ohjeita sen laskemiseen käyttämällä kasvituotepohjaista elintarvikeketjua ja sen vaiheita ensimmäisenä sovelluskohteena.

Osaprojektin tutkijat esittävät lämpimät kiitokset kaikille tähän työhön panoksensa antaneille. Erityisesti haluamme kiittää Raision Aki Fineriä, joka toimitti tietoja laskentaa varten. Energiaa koskevien laskujen tarkentamisessa kiitollisena huomioidaan LUT:n tutkija Sanni Väisäseltä saatu apu. Lisäksi haluamme kiittää kaikkia 14.2.2014 järjestettyyn asiantuntijatyöpajaan osallistuneita teollisuuden edustajia ja tutkijoita, joilta saimme palautetta laskentamenetelmästä.

Sanasto

Taulukko 1. Työssä käytetty ravinnesanasto

| | |
|-------------------------------|---|
| Hyödyntämisaste | Kertoo, miten tehokkaasti ketjun toimintaa varten käyttöön otetut ravinteet saadaan hyödynnettyä tarkasteltavassa / muussa ketjussa |
| Käyttöönotetut ravinteet | Kaikki ne ravinteet, joita on tarvittu ketjun toimintaa varten |
| Neitseelliset ravinteet | Ravinteet, jotka otetaan luonnosta ketjun käyttöön, muunnetaan reaktiiviseen muotoon |
| Kierrätysravinteet | Ketjussa käytetyt ravinteet, jotka on otettu jo muualla, muuta tarkoitusta varten käyttöön |
| Siirtyvät ravinteet | Ketjun sisällä tuotevirtojen mukana vaiheesta toiseen siirtyvät ravinteet. |
| Hukatut / menetetyt ravinteet | Ravinteet, jotka menetetään toivotusta kierrosta (päätyvät luontoon tai pitkäaikaiseen varastointiin) hävikivirrat: kiinteän jätteen ja jäteveden hyödyntämättömät ravinneosuudet typen haihtumat: NH ₃ , N ₂ O, NO _x (tarkoitetaan NO ja NO ₂ sekoitusta), N ₂ typen ja fosforin huuhtoumat vesistöön pitkäaikaisvarastoinnit; kaatopaikka, sivuvirtojen läjitys, fosforin kumuloituminen maaperään, jne. |
| Ravinteiden hyötykäyttö | Ravinteet, jotka tuottavat hyötyä tutkimuksessa tai muussa ketjussa (päätuotteen, sivutuotteiden tai hyödykkeiden sisältämät ravinteet) |
| Suljettu ravinnekierto | Ravinteiden toivottu kiertokulku, jossa korjatun sadon, elintarvikkeen käytön ja/tai jätteiden kierrätyksen kautta ravinne saadaan uudelleen maatalouden hyötykäyttöön |

Sisällys

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Johdanto | 8 |
| | 1.1. Ongelmakentän kuvaus | 8 |
| | 1.2. Tavoitteet ja soveltamisala | 9 |
| 2. | Ravinnejalanjäljen määrittelmä ja menetelmän kuvaus | 11 |
| | 2.1. Ravinnejalanjäljen erot olemassa oleviin menetelmiin | 14 |
| | 2.2. Tiedon laatuvaatimukset | 15 |
| | 2.3. Oletukset ja epävarmuuksien tarkastelu | 16 |
| | 2.4. Allokointi | 16 |
| | 2.5. Toiminnallinen yksikkö..... | 18 |
| 3. | Tuotejärjestelmän kuvaus ja laskentamenetelmät..... | 19 |
| | 3.1. Tuotejärjestelmän rajaukset | 19 |
| | 3.2. Alkutuotannon panostuotanto | 22 |
| | 3.2.1. Panostuotantovaiheen kuvaus..... | 22 |
| | 3.2.2. Panostuotantovaiheen tulokset..... | 24 |
| | 3.3. Kasvintuotanto..... | 25 |
| | 3.3.1. Kasvintuotantovaiheen tulokset | 30 |
| | 3.4. Kotieläintuotanto..... | 31 |
| | 3.4.1. Kotieläintuotantovaiheen kuvaus | 31 |
| | 3.5. Elintarvikkeiden jalostus | 33 |
| | 3.5.1. Jalostusvaiheen kuvaus..... | 33 |
| | 3.5.2. Jalostusvaiheen tulokset | 34 |
| | 3.6. Jakelu, varastointi ja kauppa..... | 35 |
| | 3.6.1. Jakelu-, varastointi- ja kauppavaiheen kuvaus..... | 35 |
| | 3.6.2. Jakelu-, varastointi- ja kauppavaiheen tulokset..... | 36 |
| | 3.7. Kulutus | 36 |
| | 3.7.1. Kulutusvaiheen kuvaus | 37 |
| | 3.7.2. Kulutusvaiheen tulokset..... | 37 |
| | 3.8. Jätehuolto | 38 |
| | 3.9. Jätehuoltovaiheen kuvaus | 38 |
| | 3.9.1. Jätehuoltovaiheen tulokset..... | 47 |
| | 3.10. Kuljetukset | 50 |
| 4. | Kokonaistulokset | 53 |
| | 4.1. Herkkyystarkastelukohteet..... | 56 |
| 5. | Yhteenveto ja johtopäätökset | 57 |
| 6. | Lähteet | 59 |

1. Johdanto

1.1. Ongelmakentän kuvaus

Typpi, fosfori ja kalium ovat pääravinteita, joiden turvattu saanti on kaiken elämisen ja globaalisti riittävän ravinnon turvaamisen perusta. On arvioitu, että maailmanlaajuisessa mittakaavassa ihmistoiminta on moninkertaistanut pääravinteiden käyttöönoton määrän ja -nopeuden teollistumisesta alkaen. Pääasiallisina syinä ovat väestömäärän kasvu, maatalouden tehostuminen ja energian käyttömahdollisuuksien ja käytön lisääntyminen..

Fosforia ja kaliumia louhitaan maaperästä lannoiteteollisuuden tarpeisiin. Laadukasta fosforikiveä esiintyy vain muutamien valtioiden alueella, ja sen määrä on rajallinen, mikä nähdään tulevaisuuden uhkana globaalille ruokaturvalle (Sutton et al. 2013). Kaliumin taloudellisesti hyödynnettävien reservien arvioidaan koko maailmassa olevan noin 6 miljardia tonnia (US Geological Survey, 2014)¹. Kaikkiaan maapallon kaliumvaroiksi arvioidaan noin 250 miljardia tonnia, mikä on yli 7000 -kertaisesti tämänhetkinen vuosittainen kaivostuotanto, joka on noin 35 miljoonaa tonnia. Kaliumesiintymiä ja -kaivostuotantoa on monissa maailman maissa.

Ilmakehä on suuressa roolissa typen luontaisessa kierrossa. Ilmakehä sisältää noin 78 % typpeä (N₂), josta sitä otetaan kiertoon joko kemiallisella lannoitevalmistuksen tai biologisella typen sidonnan avulla. Typpilannoiteprosessi perustuu Haber-Bosch- prosessiin, jossa maakaasun sisältämä vety ja ilmakehän sisältämä typpi saadaan reagoimaan katalyyttisesti korkeassa lämpötilassa ammoniakiksi. Ammoniakkia voidaan käyttää sellaisenaan, tai siitä voidaan jatkojalostaa muita lannoitevalmisteita: ureaa, ammoniumnitraattia tai ammoniumsulfaattia. Lannoitevalmistusprosessi on hyvin energiantensiivistä, ja prosessissa vapautuu epätoivottuja typen oksideja sekä ammoniakia (Galloway 2008; Kärki ja Kaartinen 2006).

Ilmakehään haihtuneet typen oksidit sekä ammoniakki aiheuttavat erilaisia ympäristöhaittoja. Ne voivat hapettua herkästi muodostaen typpihappoa, mikä laskeutuessaan hapettaa vesistöjä ja maaperää (Vuorenmaa et al. 2011). Typen oksidit osallistuvat ilmakehässä lisäksi otsonin muodostumiseen sekä toimivat haitallisina ilmansaasteina. Myös luonnon prosesseissa typpiyhdisteiden hajoessa vapautuu olosuhteista riippuen ammoniakia ja typen oksideja. Maataloustuotanto ja teollisuus aiheuttavat kuitenkin moninkertaiset päästöt luonnon prosesseihin verrattuna; esimerkiksi maatalouden arvioidaan Suomessa aiheuttavan 90 % kaikesta ammoniakkihaidunnasta (Grönroos et al. 2009). Peltoviljelyssä käyttämättä jäänyttä typpeä huuhtoutuu viljelymailta pääosin nitraattina, mutta myös pieninä määrinä ammoniumina ja orgaanisena typpenä vesistöön, missä ne aiheuttavat huuhtoutuvan rehevöitymistä ja happamoitumista.

Fosforin päästöt ohjautuvat maaperästä vesistöön, sillä fosfori ei muodosta helposti haihtuvia yhdisteitä. Vesistöön huuhtoutuu fosforia fosfaattina tai orgaanisena fosforina luonnonvoimien maaperän eroosion vaikutuksesta, mutta ennen kaikkea maatalouden ja muun ihmistoiminnan myötä. Veteen liuennut fosfori toimii eliöstölle ravinteena, aiheuttaen myös vesistön rehevöitymistä ja happamoitumista.

On arvioitu, että globaalisti fosfaattia louhitaan kaivoksista vuosittain 17,5 Mt. Suurin osa tästä osuudesta päättyy ruoan tuotantoon (82 % lannoitevalmistukseen, 5 % rehuainekseksi ja pieni osuus elintarvikkeiden lisäaineeksi), noin 10 % käytetään pesuaineiden valmistukseen sekä 3 % muuhun teollisuuskäyttöön. Louhitusta fosfaatista häviää prosessointi- ja kulutusketjujen aikana huomattavia määriä niin, että ihmisravinnoksi päättyy arvioiden mukaan vain viidesosa alkuperäisestä fosforimäärästä (Cordell et al. 2009). Kussakin vaiheessa matkalla louhimisesta ruokapöytään tapahtuu jonkin-

¹ U.S. Geological Survey and U.S. Department of the Interior 2014. Mineral commodity summaries 2014. Saatavissa verkosta: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>

laisia fosfori-häviöitä, jotka kaikki eivät suinkaan tarkoita fosforin huuhtoutumista vesistöön, vaan fosforia varastoituu myös ketjun aikana mm. lannoitevalmistuksen sivuvirtoihin, maatalousmaahan, tuhkaosastumiin tai rakennusmateriaaleihin (Schröder et al. 2010).

Fosfori on uusiutumaton luonnonvara, jonka riittävydestä on monenlaisia arvioita. Nykyisellä käytöllä fosforivarojen arvioidaan riittävän 60–130 vuodeksi, korkealaatuisen fosfaattimalmin sen sijaan 50–100 vuodeksi (Steen 1998; Smil 2000; Smit ym. 2009; Fixen 2009). Maailman fosforivaroista 80 % on viiden valtion alueella: Marokko ja Länsi-Sahara, Kiina, Saudi-Arabia, Jordania ja USA (Schröder et al. 2010). On arvioitu, että piakkoin ollaan myös saavuttamassa uusiutumattoman fosforin käyttöönoton maksimia, ”fosfori-piikkiä”, minkä jälkeen louhittu fosfori on vähäisempää, tai huonolaatuisempaa. Muiden kaivannaisravinteiden, kuten kaliumin tai sinkin riittävydestä tulisi myös tehdä arvioita. Kaliumia arvioidaan olevan kuitenkin saatavilla pitkään tulevaisuudessa, jopa 7000 vuodeksi nykyisellä kulutuksella, ja louhittavat varat ovat suhteellisen hyvin taloudellisesti saatavilla (Sutton et al 2013).

Ravinteiden käytön tehokkuus on hyvin alhaisella tasolla koko ketjua ajatellen: käyttöön otetusta tyypestä noin 80 % ja fosforista 25–75 % (riippuen maaperään sitoutumis-asteesta) menetetään ravinnepäästöinä, hukkavirtoina ja energian käyttöönottona luontoon. Ravinnevarojen ehtymisen lisäksi ravinnevuodot aiheuttavat haittaa maaperän, vesistön ja ilmakehän laadulle, mutta myös biodiversiteetille ja ekosysteemeille. Vakava uhka on myös ravinnetalouden edistämä ilmaston lämpeneminen Runsaasta ravinteiden käytöstä aiheutuvat ympäristöhaitat kulmineituvat teollistuneisiin maihin, eli Eurooppaan, Pohjois-Amerikkaan, Aasiaan sekä Latinalaiseen Amerikkaan (Sutton et al 2013).

Edellä mainituista tekijöistä johtuen ravinteiden käyttöä tuoteketjuissa tulee tehostaa. Tehostamisesta kantavat suurta vastuuta niin poliittiset päätöksentekijät kuin kuluttajatkin. Tuoteketjujen ekologisuuden viestimiseksi on kehitetty erilaisia jalanjälkityökaluja, kuten esimerkiksi hiili- ja vesijalanjälki. Ravinteiden käytön tehostamistarkoituksessa esitetään seuraavaksi ravinnejalanjäljen laskentaohjeistus.

1.2. Tavoitteet ja soveltamisala

Ravinnejalanjälkimenetelmä on kehitetty elintarvikeketjujen ravinnetalouden tarkasteluun. Koska ravinnevirta-analyyysien mukaan suurimmat typpi- ja fosforivirrat kohdistuvat lannoitevalmistukseen, ja ruoan tuotanto- ja kulutusjärjestelmiin (Antikainen 2007), tarkastelu rajataan tässä raportissa elintarvikeketjuihin. Kuitenkin nähdään, että raportissa esitettyä ravinnejalanjäljen laskentaperiaatetta voidaan soveltaa myös muilla sektoreilla kuin elintarvikeketjuille. Ravinnejalanjälki sopii esimerkiksi metsäteollisuuden tuotteiden sekä bioenergiajärjestelmien ja biomateriaalien (esimerkiksi biomuovit) kestävyystarkasteluun. Edelleen se sopii muun muassa entsyymi-, kosmetiikka- ja lääketeollisuuden tuotteille, joiden pääraaka-aineet tulevat kasvi- ja eläinkunnista. Muidenkin toimialojen tarkasteluihin se myös sopii maankäytön muutoksiin kytkeytymisen kautta

Ravinnejalanjäljen tavoitteena on tuottaa kokonaiskuva ravinteiden käytöstä yksittäisen elintarvikkeen tuotanto- ja kulutusketjussa. Raportti toimii ketjukohtaisen ravinnejalanjäljen laskennan menetelmäkuvausena. Laskennassa tunnistetaan nykytilannetta kuvaavat ravinteiden kulutuksen ja ravinnevuotojen määrät elintarvikeketjun eri osissa. Elintarvikeketjun ravinteiden kulutus ja ravinteiden käytön tehokkuus on ensivaiheessa tunnistettava ketjun eri osissa, jotta halutessa voidaan kehittää ketjun ravinnetaloutta. Laskentakuvaus on jaoteltu tutkittavan tuotanto- ja kulutusketjun elinkaaren vaiheisiin, joissa kussakin pureudutaan kyseisen vaiheen ravinteiden käytön tehokkuuteen ja laskentaan. Ohjeistusta on havainnollistettu Suomessa tuotetun kaurahiutaletuotteen avulla.

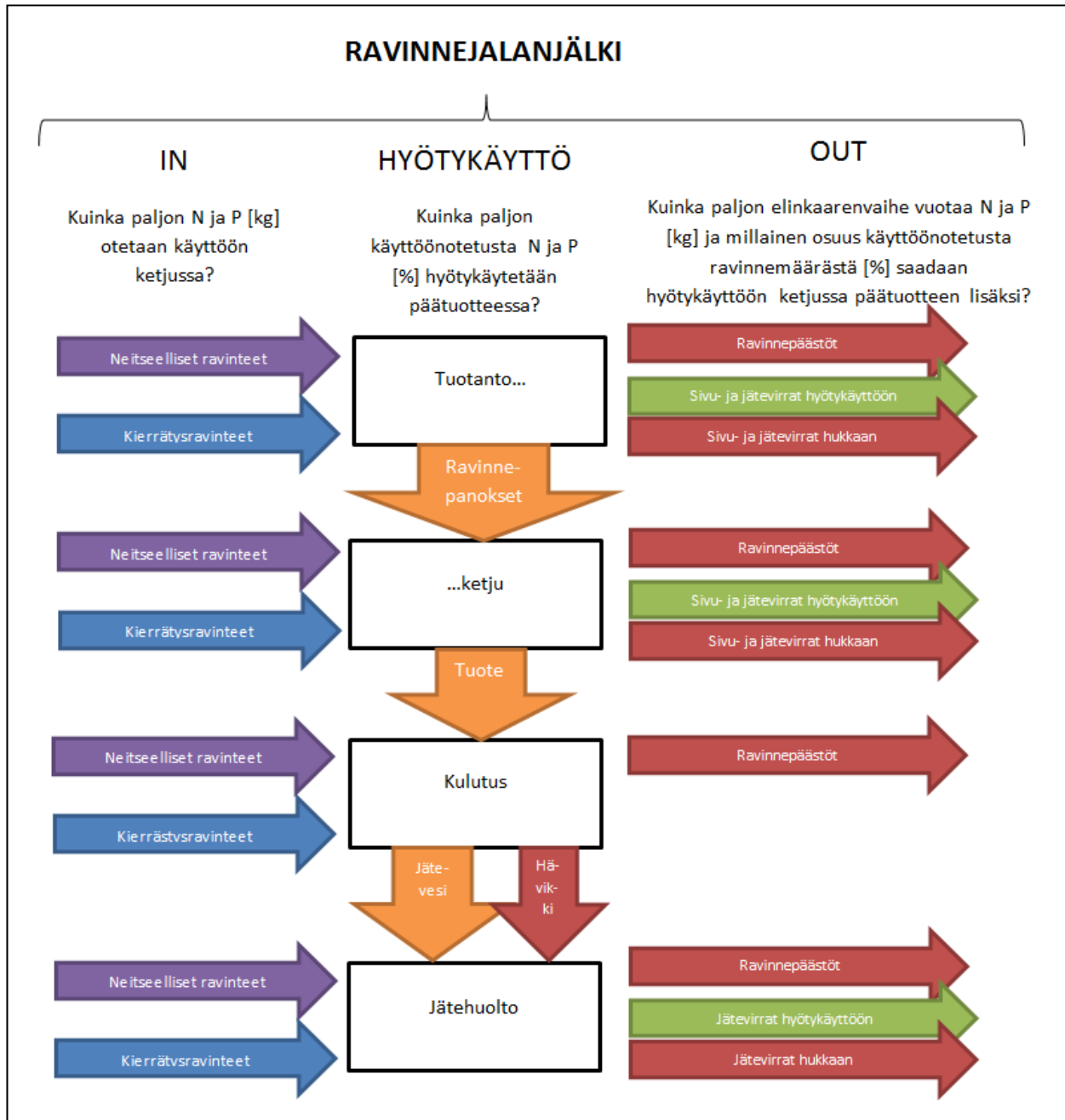
Laskennalla tuotetaan tietoa elintarvikeketjun eri toimijoiden käyttöön, mutta myös yleistietona niin kuluttajille kuin päätöksentekijöille. Ketjun pilkkomisella elinkaarenvaiheisiin, ja näiden kunkin vaiheen ravinnehallinnan osittaisella tarkastelulla mahdollistetaan ketjun ravinteiden hallinnan tehostaminen halutuissa ketjun osissa. Pitkällä tähtäimellä nähdään, että elintarvikeketjun toimijat

voivat tuotteen ravinnejalanjäljen selvitettyään käyttää sitä markkinointitarkoituksissa kuluttajille, tuottajille ja muille sidosryhmille viestiessään.

Tässä työssä keskitytään kuvaamaan pääravinteista vain typen ja fosforin käyttöä. Kolmas pääravinne kalium on myös tärkeä komponentti kokonaisravinnetaloudessa, jonka saatavuus tuoteketjun käyttöön on myös rajallista, mutta ennusteet riittävydestä ovat huomattavasti pidemmät kuin fosforin suhteen (Sutton et al. 2013). On myös arvioitu, että globaalisti lannoitevalmistukseen käytetystä energiasta 92,5 % kuluu typen valmistukseen, kun fosforin osuus on 3,0 %, ja kaliumin 4,5 % (Galloway 2008). Näin ollen nähdään, että kalium voidaan rajata tässä vaiheessa pois tarkastelusta, mutta on myöhemmin tarpeen tullen liitettävissä ravinnejalanjälkeen.

2. Ravinnejalanjäljen määritelmä ja menetelmän kuvaus

Ravinnejalanjälki määritellään mittariksi, joka kuvaa **ravinneresurssien käyttöönottoa ja hyödyntämistä** tarkasteltavassa ketjussa. Tarkasteltava ketju kattaa tuotteen elinkaaren ”kehdestä kehtoon”, eli tuotteen tuottamisen, kuluttamisen, mutta myös kierrättämisen (kuva 1).



Kuva 1. Ravinnejalanjäljen pääperiaate

Ravinnejalanjäljessä erotetaan resurssinkulutus sekä resurssin käyttötehokkuus, eli keskitytään

1. 1) elintarvikeketjussa käyttöönotettujen ravinteiden määrään [kg N ja kg P], sekä
2. 2) käyttöönotettujen ravinteiden hyödyntämistehokkuuteen [%].

Ravinnejalanjäljen ylemmän tason viesti on seuraava:

Tuotetta varten otettiin x kg ravinteita käyttöön,
josta hyödynnettiin tuotteessa y %.

Käyttöön otetut ravinteet kuvaavat kaikkia elintarvikeketjun elinkaaren aikana käyttöön ottamia ravinteita tarkasteltavassa nykytilassa. Käyttöön otetut ravinteet voivat päätyä ketjun aikana mihin tahansa seuraavista vaihtoehdoista: loppu- tai sivutuotteisiin, varastointiin tai luontoon. Käyttöön otetut kokonaisravinteet voidaan jakaa ns. **neitseellisiin ravinteisiin sekä kierrätysravinteisiin**.

Neitseellisillä ravinteilla tarkoitetaan ravinteita, jotka ensimmäisen kerran muunnetaan reaktiiviseen muotoon luonnosta otettuina. Hyödyntämiskierto on otettuina ne voivat aiheuttaa ympäristöarastusta, joka poikkeaa niiden lähtötilanteestaan aiheuttamista vaikutuksista. Neitseellisiksi ravinteiksi määritellään teollisesti valmistettujen lannoitteiden ravinteet, lannoitevalmistuksessa menetetyt ravinteet sekä ketjun aikana tarvittavien energiapanosten ja kuljetussuoritteiden polttoaineiden sisältämät ravinteet. Näistä energian ja kuljetussuoritteiden sisältämät ravinteet määritellään ainakin yhtä suuriksi kuin prosessissa vapautuneet typen päästöt (NO_x, N₂O, NH₃). Yhteensä nämä muodostavat eli neitseellisten ravinteiden kokonaismäärän teollisten ravinnevirtojen osalta. Biologisen typen sidonnan kautta kiertoon saatetut typpiravinteet luetaan myös mukaan neitseellisiin ravinteisiin.

Kierrätysravinteilla tarkoitetaan typpeä ja fosforia, jotka on otettu ihmisten toimesta käyttöön jotakin aikaisempaa tarkoitusta varten, ja joita käytetään nyt tarkasteltavassa elintarvikeketjussa aikaisemmista hyödyntämisketjuista käyttöön otettuina kierrätettynä ravinteena. Kierrätysravinteita ovat mm. ravinteita sisältävät sivuainevirrat, kasvimassat, eläinten lanta sekä kierrätysmateriaalia sisältävät polttoainepanokset.

Näiden kahden, neitseellisten ja kierrätysravinteiden käyttöönoton yhteismäärä on ketjun ravinteiden kokonaiskäyttöönotto. Se kuvaa tutkittavan ketjun tarvitsemaa kokonaistyyppiä [kg N] ja -fosforia [kg P]. nykytilassa. ja Kokonaiskäyttöönoton määrää voidaan tarkastella suhteessa elintarvikeketjujen pienempiin tai suurempiin kokonaisuuksiin. Ravinteiden kokonaiskäyttöönotto voidaan laskea erilaisille ruoka-annoksille tai erilaisille tiettyyn aikaan rajatuille dieeteille. Lisäksi ravinteiden kokonaiskäyttöönoton kautta voidaan arvioida ravinteiden riittävyyttä nykytoimilla /-kulutuksella kansallisesti tai globaalisti. Käyttöön otettujen ravinteiden jakautumista neitseellisiin ravinteisiin ja kierrätysravinteisiin kuvataan näiden prosentiosuuksilla käyttöönotettujen ravinteiden kokonaismäärästä:

Ravinteiden kokonaiskäyttöönotto:

Neitseellisiä ravinteita %
Kierrätysravinteita %

Käyttöön otettujen ravinteiden (neitseelliset ja kierrätysravinteet, yhdessä ravinteiden kokonaiskäyttöönotto) lisäksi toinen tärkeä parametri ravinnejalanjäljessä on **käyttöön otettujen ravinteiden hyödyntämistä**. Päättävänä on tehostaa päätuoteketjua, eli tuottaa tarkasteltavaa tuotetta mahdollisimman pienillä ravinnepanoksilla, jolloin saavutetaan paras ravitsemushyöty):

Ravinteiden hyötykäyttöaste (päätuote) (NUE_{tuote}):

$$\frac{\text{Päätuotteen sisältämät ravinteet}}{\text{Ketjun ottamat kokonaisravinteet}} \times 100 \quad (1)$$

Ravinteiden hyötykäyttöaste kokonaisuudessaan (NUE_{tot}):

$$\frac{\text{Ravinteet (päätuote) + Ravinteet (muu hyötykäyttö)}}{\text{Ketjun ottamat kokonaisravinteet}} \times 100 \quad (2)$$

Hyötykäyttöön menevillä ravinteilla tarkoitetaan sitä osuutta ravinteista, joka saadaan tavalla tai toisella hyötykäyttöön käyttöönotetuista ravinteista, eli osuutta, jota ei hukata päästöinä. Hyödyntäminen tarkoittaa halutun päätuotteen lisäksi sivutuotteita, tai muita hyödykkeitä, joita ravinteilla saadaan aikaiseksi (kuten kompostoinnin ja mädätyksen lopputuote, jota käytetään lannoitustarkoituksessa). Ravinne voidaan luokitella hyödylliseksi, jos sillä korvataan neitseellisen ravinteiden käyttöä. Parhaimmillaan tämä tarkoittaa ravinteiden suoraa hyötykäyttöä toisen ravintotuotteen tuottamiseen tai ravinteiden suljettua kiertoa takaisin maatalouteen.

Elintarvikeketjussa menetetyt ravinteet tarkoittavat luontoon hukattuja ravinteita, joiden suora hyödyntäminen on mahdotonta. Menetettyjä ravinteita ovat ilmakehään haihtuneet typen yhdisteet: dityppioksidi (N_2O-N), ammoniakki (NH_3-N), typen oksidit ($NO-N$ ja NO_2-N) sekä myös ilmakehään päässyt N_2 , vesistöön huuhtoutuvat typen (ammonium NH_4-N , nitraatti NO_3-N , orgaaninen typpi) sekä fosforin yhdisteet (fosfaatti PO_4-P , orgaaninen fosfori). Ketjuun otetun typpiravinteiden haihtuessa ilmakehään inaktiivisena typenä myös sen ajatellaan olevan hukattua ravinnettä, sillä sen takaisin saattaminen kiertoon vaatii paljon energiaa (ks. Alkutuotannon panostuotanto: lannoitevalmistus). Kierrosta hukattuja ravinteita ovat myös kaatopaikalle, rakennusteollisuuteen tai pitkäaikaiseen varastointiin päätyvät ja myös maaperään eri muodoissaan tarkasteluvuonna käyttämättä jääneet ravinteet.

Tuotteen ravinnejalanjäljen tulokset, jossa yhdistyy edellä kuvattu laskenta, voidaan kuvata seuraavilla virkkeillä typelle ja fosforille:

Ravinnejalanjälki: typpi

Tuoteketjua varten otettiin x kg typpeä käyttöön,
josta hyödynnettiin tuotteessa y %,
ja kaikki hyötykäyttö huomioonottaen z %.
Käyttöönotetuista ravinteista n % oli neitseellistä ja k % kierrätysravinteita.

Ravinnejalanjälki: fosfori

Tuoteketjua varten otettiin x kg fosforia käyttöön,
josta hyödynnettiin tuotteessa y %,
ja kaikki hyötykäyttö huomioonottaen z %.
Käyttöönotetuista ravinteista n % oli neitseellistä ja k % kierrätysravinteita.

Ravinnejalanjälki on arvokkaiden ravinne-resurssien kulutusmittari. Käyttöön otettujen ravinteiden määrä sekä niiden hyödyntämisaste viestivät ruuantuotannon ja -kulutuksen kestävydestä ravinteiden riittävyyden näkökulmasta. Mitä suurempi on käyttöön otettu ravinmäärä, ja mitä pienempi hyödyntämisaste on, sitä enemmän ravinteita hukataan ympäristöön, ja sitä heikompi on elintarvikeketjun ravinnejalanjälki. Neitseelliset ja kierrätysravinteet pidetään laskennassa erikseen, jotta ketjukohtaista neitseellisen ravinteiden osuutta voidaan ketjua kehitettäessä pienentää.

Ravinnejalanjälki ei menetelmänä korvaa muita ympäristövaikutusten arviointiin käytettyjä menetelmiä ja mittareita, kuten elinkaariarvioinnilla tarkasteltavaa rehevöitymis-, happamoitumis- tai ilmastonmuutospotentiaalia. Sen sijaan ravinnejalanjälki toimii näiden rinnalla omassa roolissaan korostamalla nimenomaan ravinneresurssien kulutusta ja ravinneresurssien käytön tehokkuutta.

Menetelmä perustuu elinkaariajatteluun, jossa huomioidaan typen ja fosforin virrat, jotka otetaan käyttöön ketjun tarpeisiin, kulkeutuvat tarkasteltavan ketjun läpi, ja jotka menetetään ketjun aikana. Ravinnejalanjäljessä käytetty laskentamenetelmä mukailee elinkaarilaskentaa inventaariovaiheeseen saakka. Sen sijaan systeemistä karanneiden typen ja fosforin yhdisteiden karakterisointia ei tehdä, toisin sanoen samankaltaista ympäristövaikutusarviointia ei suoriteta, kuten esimerkiksi laskeuttaessa hiilijalanjälkeä tai happamoitumis- ja rehevöitymispotentiaalia.

Typpeä ja fosforia sisältävistä yhdisteistä huomioidaan erikseen vain typen ja fosforin määrä. Typpiyhdisteet muunnetaan ravinnejalanjälkilaskentaa varten muotoon ”typpi yhdisteessä”, kuten ”typpi ammoniakissa (merkitään $\text{NH}_3\text{-N}$)” tai ”typpi dityppioksidissa (merkitään $\text{N}_2\text{O-N}$)”, tai ”typpi aineessa” silloin kun aineeseen sisältyy useampia useita typpiyhdisteitä, joiden koostumuksia ei tunneta riittävästi, mutta joiden kokonaispitoisuus aineessa tunnetaan, kuten esimerkiksi orgaanisten sivuvirtojen tapauksessa. Fosforyhdisteet muunnetaan vastaavasti muotoon ”fosfori yhdisteessä” tai ”fosfori aineessa”. Yhdisteessä olevan typen/fosforin määrän laskenta perustuu kyseisen ravinteiden suhteelliseen massaosuuteen yhdisteen molekyyllisessä: Esimerkiksi 1 g N_2O :ta muunnetaan $\text{N}_2\text{O-N}$:ksi: $1 \text{ g} * (28/44)$, eli otetaan huomioon vain typen osuus kustakin komponentista ($2 * \text{N} (14) = 28$; $\text{O} = 16$; $\text{N}_2\text{O} = 44$).

2.1. Ravinnejalanjäljen erot olemassa oleviin menetelmiin

Seuraavassa on lyhyesti kuvattu merkittävimpiä ravinnejalanjälkimenetelmän eroja elinkaariarviointiin, materiaali- / ainevirta-analyysiin, N-Print -laskentamenetelmään ja Our Nutrient World-reportissa (Sutton et al. 2013) esitettyyn ravinteiden käytön tehokkuuslukuun.

- Elinkaariarvioinnissa (LCA) tarkastellaan tarkasteltavan tuotejärjestelmän sisälle otettuja resursseja ja huomioidaan, kuinka paljon niiden tuottamisesta, käytöstä ja jätteenkäsittelyssä syntyy päästöjä. Nämä päästöt kerrotaan karakterisointikertoimilla, jotta eri päästöt voidaan ”arvottaa” vaarallisuutensa mukaan ja sen jälkeen summata yhteen ja arvioida tarkasteltavan tuotejärjestelmän happamoitumis- ja rehevöitymispotentiaalia.
 - Ravinnejalanjäljessä syntyviä päästöjä ei karakterisoida, vaan arvioidaan sitä yhteismäärää, joka poistuu elintarvikeketjusta, ja jota ei voida enää käyttää hyödyksi ravinteena elintarvikeketjussa.
 - Ketjusta vuotaneet typpi ja fosfori voidaan tunnistaa yhdistekohtaisesti toiminnallista yksikköä kohden, jolloin tätä inventaariotietoa voidaan käyttää happamoitumis- ja rehevöitymispotentiaalin selvittämiseen, mikäli laskentaa halutaan viedä ympäristövaikutusten arviointiin asti.
- Materiaalivirta- tai ainevirta-analyysissä tarkastellaan tutkittavan järjestelmän materiaali- tai ainevirtoja, eli esim. järjestelmään tulevia ravinnepanoksia ja järjestelmästä poistuvia ravinnetuotoksia. Tällöin järjestelmään tulevien ainevirtojen määrä on yhtä suuri poistuvien virtojen kanssa (aineen häviämättömyyden laki). Tällä menetelmällä, kuten ravinnejalanjäljelläkin, kiinni-

tetään LCA:ta enemmän huomiota käytettyjen resurssien määrään, joka on tärkeä tieto tarkastellessa resurssien kulutusta.

- Ravinnejalanjäljellä pyritään luokittelemaan tarkasteltuja ravinnevirtoja tarkemmin: Käytetyt ravinnevirrat jaetaan neutraaleihin ravinteisiin ja kierrätysravinteisiin, jotta voidaan eritellä, otetaanko ketjussa käyttöön uutta ravinnetta vai hyötykäytetäänkö jo kierrossa olevia kierrätysravinteita.
- Lisäksi ravinnejalanjälki kertoo ravinteiden käytön tehokkuudesta enemmän kuin pelkkä materiaali- tai ravinnetase. Ravinteiden hyödyntämisaste kertoo, kuinka suuri osa käytetyistä ravinteista saadaan käytettyä hyödyksi ja kuinka suuri osa menetetään ravinnevuotoina.
- N-print-laskentamenetelmä (N print 2014), joka löytyy Internetistä laskurina, ottaa huomioon vain kulutuksen aiheuttamat typen häviövirrat, jotka tuottavat ympäristöaristusta (ei N_2).
 - Ravinnejalanjäljessä otetaan myös fosforin virrat huomioon. Molempien ravinteiden suhteen otetaan resurssinäkökulma mukaan (ketjussa käyttöönotetut ravinteet), sekä muodostetaan hyödyntämisaste ketjussa. Tällöin N_2 ajatellaan myös ravinnehäviöksi, koska sen takaisin tuottaminen vaatii olennaisia ravinnepanoksia (energiaa).
- Our Nutrient World -raportissa (Sutton et al. 2013) määritetään tutkittavan elintarvikeketjun kattava ravinteiden tehokkuusluku suhdelukuna: halutun tuotteen sisältämät ravinteet suhteessa ketjun tarvitsemiin neutraaleihin ravinteisiin. Tällöin uusina ravinteina pitää ottaa huomioon ainakin mineraalilannoitteet, biologisen typen sidonnan kautta tullut typpi sekä lannoitevalmistuksessa typpimäärä, joka muuntuu typen oksideiksi.
 - Ravinnejalanjäljessä tehokkuuslaskennassa (hyödyntämisaste) otetaan huomioon ketjuun tulevat kokonaisravinteet, sillä myös kierrätysravinteiden (etenkin lannan) kestäväällä käytöllä on merkitystä kestävästä ravinnetalouden tarkastelussa. Ketjuun otettujen ravinteiden hyödyntämisaste haluttiin ulottaa tässä laskennassa elinkaaren loppuun saakka, jolloin nähdään ravinteiden todellinen hyöty / haitta. Ravinnejalanjäljessä halutaan lisäksi erottaa neutraalin ja kierrätysravinteiden käyttöönotot erikseen, jotta voidaan määrittää ketjun neutraalien ravinteiden määrä.

2.2. Tiedon laatuvaatimukset

Lähtötiedon laatu, johon laskenta perustuu, vaikuttaa merkittävästi saatuihin tuloksiin. Lähtötieto voidaan jakaa laadullisiin perusteisiin kolmeen luokkaan:

1. Tuotantoketjukohtainen, mitattu tieto
2. Kirjallisuus- tai julkaisematon tutkimustieto
3. Asiantuntija-arvio

Lähtökohtana on, että mitä todenmukaisempaa tietoa tutkittavasta ketjusta saadaan, sitä parempi. Luvussa 3 on elinkaaren vaiheiden laskentakuvausten yhteydessä kuvattu myös lähtötiedon laatuvaatimukset / -suositukset. Lähtötietovaatimukset voidaan asettaa myös laskennan tavoitteiden mukaisesti. Jos halutaan laskea tuotantoketjun ravinnejalanjälki, esim. tietyn tuottajan tuottamalle tuotteelle, tiedot hankitaan niin pitkälle kuin mahdollista ko. tuotantoketjun toimijoilta. Jos laskenta kohdistetaan Suomessa yleisesti tuotetulle tuotteelle, voidaan käyttää Suomesta laskettuja keskimääräisiä tietoja niin rehun, lannan käytön, jalostuksen kuin logistiikan suhteen.

On huomattava, että kaurahiutaleille tehdyssä laskentaesimerkissä laskenta on tuotespesiifää vain tuotteen jalostamiseen asti. Tuotteen jakelu, varastointi, kauppa, ja jätehuolto ovat pääpiirteittäin samanlaisia kaikille tuotteille riippumatta siitä, mistä elintarvikkeesta on kyse.

2.3. Oletukset ja epävarmuuksien tarkastelu

Elinkaariarvioinnin tyyppiset laskelmat sisältävät aina paljon epävarmuuksia liittyen käytettyyn lähtötietoon ja tehtyihin oletuksiin. Laskennassa joudutaan tekemään oletuksia ja yleistyksiä sekä käyttämään keskiarvotietoja, riippuen tarkasteltavasta elintarvikkeesta ja sen elintarvikeketjusta. Seuraavassa kuvataan tällaisia tilanteita:

- Viljelykohtainen laskenta tulee perustua lohko-kohtaisiin tietoihin. Tietojen kirjaaminen voi olla hyvin erityyppistä viljelijöiden kesken, joten kirjaamisepätarkkuudet maatalouslaskennassa saattavat tuoda epävarmuutta laskentaan.
- Suomen maatalouden tuotantorakenne on hyvin epätasaisesti jakautunut Suomen alueelle. Lisäksi lämpötila- ja maaperäerot voivat olla merkittäviä Suomen eri osissa. Näin ollen on keskiarvotiedon käyttäminen case -tilojen sijasta voi antaa erityyppisen tuloksen ravinnejalanjäljessä;
- Tuotteita myydään ja varastoidaan valtakunnan tasolla useissa erilaisissa ja erilaisilla paikkakunnilla sijaitsevilla myymälöissä, joten laskennassa joudutaan käyttämään keskiarvotietoja kuljetusmatkojen ja energian kulutuksen suhteen;
- Tuotetta kulutetaan kuluttajien toimesta niin kotona kuin Horeca -sektorilla, ja kaikissa kulutus-tilanteissa hävikkiin päätyvän tuotteen määrä voi olla erilainen, joten hävikkimäärää on arvioitava aiheesta tehtyjen tilastollisten tutkimusten perusteella.
- Jätteen syntypaikkaa ei voida määrittää, ja valtakunnallisesti jätettä käsitellään erilaisin menetelmin eri alueilla, joten on arvioitava keskimääräisiä jätteenkäsittelyreitit Suomessa sekä käytettävä keskimääräisiä jätteenkäsittelylaitosten arvoja.

Tehtyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia kuvataan kunkin elinkaaren vaiheen kohdalla luvussa 3. Oletukset ja yksinkertaistukset on pyritty tekemään varovaisuusperiaatetta noudattaen, eli niin, että valinnan takia tarkasteltavan elintarvikkeen ravinnejalanjäljestä ei synny ainakaan liian hyvää kuvaa. Luvussa 4.1 otetaan kantaa siihen, millaisia herkkyystarkasteluja suositellaan tehtäväksi, jotta saadaan selville, kuinka paljon epävarmuutta aiheuttavat tekijät ja valinnat aiheuttavat tuloksiin.

2.4. Allokointi

Ravinnejalanjälkeä määriteltessä allokointia pyritään välttämään niin pitkälle kuin se on mahdollista. Jos allokointia ei voida välttää, se tehdään massaperusteisesti.

On pyritty selventämään ravinnejalanjäljessä käytettyjä allokointiperiaatteita, kun tuotejärjestelmä tuottaa päätuotteen lisäksi myös sivutuotteita tai jätevirtoja, joiden ravinnesisältöä voidaan käyttää hyväksi muissa tuotejärjestelmissä. Tarkastellaan kolmea tapausta:

1. Tuotejärjestelmä A tuottaa sivuvirran, jonka ravinnesisältöä pystytään käyttämään hyväksi tuotejärjestelmässä B, mutta tätä varten virtaa on käsiteltävä tai jalostettava
 - a. Tuotejärjestelmä A:n kannalta ravinne päätyy hyötykäyttöön, joten A:lle on annettava ravinnejalanjäljessä sille kuuluva hyöty, koska se pitää ravinteen kierrätyskelpoisena. Tämä näkyy A:n ravinnejalanjäljessä suurempana ravinteiden käytön tehokkuutena (NUE_{tot}), kun huomioidaan koko tuoteketju sivutuotteineen.
 - b. Jotta materiaali olisi käyttökelpoista tuotejärjestelmässä B, se vaatii käsittelyä. Tämä on vastaa raaka-aineen valmistusta tuotejärjestelmä B, joten käsittelystä syntyvät ravinne-päästöt allokoitetaan kokonaisuudessaan tuotejärjestelmälle B.
 - c. Tuotejärjestelmän B ravinnejalanjälkeä laskettaessa tämä sisään tuleva ravinne katsotaan kierrätetyksi ravinteeksi, mikä näkyy B:n ravinnejalanjäljessä suurempana kierrätettyjen ravinteiden osuutena käyttöönotetuissa ravinteissa.
 - d. Kierrätetyn materiaalin ravinteen käytön tehokkuus tarkastellaan myös tuotejärjestelmä

B:n ravinnejalanjälkeä laskettaessa. Eli mikäli kierrätettyä materiaalia pystytään käyttämään kokonaisuudessaan hyväksi ja/tai siitä aiheutuu ravinnepäästöjä, se näkyy B:n ravinnejalanjäljessä pienempänä ravinteiden käytön tehokkuutena.

2. Tuotejärjestelmä A tuottaa sivuvirran, jota voidaan sellaisenaan käyttää tuotejärjestelmässä B
 - a. Tuotejärjestelmä A:n kannalta ravinne päättyy hyötykäyttöön, joten A:lle on annettava ravinnejalanjäljessä sille kuuluva hyöty, koska se pitää ravinteiden kierrätyskelpoisena. Tämä näkyy A:n ravinnejalanjäljessä suurempana ravinteiden käytön tehokkuutena (NUE_{tot}), kun huomioidaan koko tuoteketju sivutuotteineen.
 - b. Koska A:n sivuvirta on käyttökelpoista sellaisenaan (valmis tuote) tuotejärjestelmässä B ja sitä voidaan suoraan käyttää raaka-aineena, ei käsittelylle ole tarvetta. Näin ollen päästöjä ei tarvitse allokoida.
 - c. Menetellään samalla periaatteella kuin edellä kohdassa 1 on esitetty.
 - d. Menetellään samalla periaatteella kuin edellä kohdassa 1 on esitetty.

3. Tuotejärjestelmä A tuottaa jätevirran, joka on käsiteltävä, mutta käsittelyn jälkeen jätevirran ravinnesisältö on mahdollista hyötykäyttää tuotejärjestelmässä B.
 - a. Tuotejärjestelmä A:n kannalta ravinne päättyy hyötykäyttöön, joten A:lle on annettava ravinnejalanjäljessä sille kuuluva hyöty, koska se mahdollistaa ravinteiden kierrätyksen. Toisaalta materiaali on tuotejärjestelmän A:n jäte, joka tulee joka tapauksessa käsitellä, päätyisi se sitten kierrätysmateriaaliksi, energiahyötykäyttöön tai loppusijoitukseen.
 - b. Jotta materiaali olisi käyttökelpoista tuotejärjestelmässä B, se vaatii käsittelyä, kuten kompostointia tai mädätystä. Vaikka jätteenkäsittelyn lopputuotetta voitaisiin käyttää raaka-aineena tuotejärjestelmässä B, katsotaan jätteenkäsittelyn kuuluvan olennaisesti tuotejärjestelmään A, koska jättemateriaali on käsiteltävä haitallisuutensa ja/tai jätemäärän pienentämisen vuoksi. Näin ollen jätteidenkäsittelystä syntyvät ravinnepäästöt allokoidaan kokonaisuudessaan tuotejärjestelmälle A.
 - c. Menetellään samalla periaatteella kuin edellä kohdassa 1 on esitetty.
 - d. Menetellään samalla periaatteella kuin edellä kohdassa 1 on esitetty.

Kierrätyksen allokointi ravinnejalanjäljessä tapahtuu siis osittamalla ravinteiden kierrätys tuotejärjestelmien välille huomioimalla 1) tuotejärjestelmässä käyttöönotetun kierrätysravinteiden osuuden ravinteiden käyttöönottomäärästä (eli sitä parempi, mitä suurempi on kierrätysravinteiden osuus) ja 2) tuotantoketjun ravinteiden hyötykäyttöaste kokonaisuudessaan, eli huomioimalla myös sivutuotteiden ja jätevirtojen ravinnesisällön hyötykäytön toisessa tuotejärjestelmässä (NUE_{tot} yhtälö 2). NUE_{tuote} (yhtälö 1) huomioi siis ainoastaan päätuotteessa hyötykäytetyt ravinteet, kun ei haluta tarkastella sivutuotteiden ja jätevirtojen ravinteiden hyötykäytön tehokkuutta. Tällöin pystytään allokoidaan päätuotteen tuoteketjulle sille kuuluva hyöty, kun se pystyy tarjoamaan toisen tuotejärjestelmään raaka-ainetta pitämällä materiaalin kierrätyskelpoisena. Ravinteiden hyötykäyttöaste kokonaisuudessaan (NUE_{tot}) siis parantaa aina ravinteiden hyötykäyttöastetta, jos samaa ravinnepanosta käytetään sekä päätuotteessa, että kierrättämällä myös muissa tuotteissa.

Näillä periaatteilla keskitytään siis siihen potentiaaliin, joka tuotejärjestelmällä on tarjota tai käyttää kierrätysravinnetta. Mikäli halutaan tehdä tiettyyn toimintaympäristöön sijoitettuja tarkasteluja, voidaan laskea myös vältettyjä päästöjä, kun esimerkiksi käytetään väkilannoitteen sijaan kierrätettyä lannoitetta, ja vältetään näin väkilannoitteen valmistukselta. Tämä on kuitenkin suositeltavaa lähinnä silloin, kun tuotantoketjun kehittämistarkoituksessa etsitään suurimpia päästövähennysolehtoja. Yleisen tason tarkasteluissa vältettyjä päästöjä laskettaessa joudutaan usein tekemään erilaisia oletuksia vältetystä prosessista, mikä saattaa johtaa myös epärealistisiin lopputuloksiin.

2.5. Toiminnallinen yksikkö

Toiminnallinen yksikkö tarkoittaa vertailuyksikköä, jota kohden ravinnepanokset ja -tuotokset ilmoitetaan. Toiminnalliseksi yksiköksi ravinnejalanjälki-laskennassa on valittu tuot, jonka koko voidaan määrittää halutun suuruiseksi. Laskenta voidaan tehdä esim. yhtä litraa maitoa tai 1 kg kaurahiutalepakettia kohden. Toiminnallisen yksikön valinta määrittelee tarkasteltavan tuotejärjestelmän rajaukset, eli sen, mitä toimintoja laskennassa otetaan huomioon (Antikainen (toim.). 2010).

Tässä raportissa esimerkkinä käytetyssä case-laskennassa tarkastelun kohteeksi on valittu 1000 kg kaurahiutaletta (tuhat 1 kg:n kaurahiutalepakkausta). Tämä siksi, että ravinnevirrat, etenkin ravinnehäviöt ovat yksilöitynä usein hyvin pieniä osuuksia, joten vasta 1000 kaurahiutalekilon ravinnevirroista saadaan helposti ymmärrettävät luvut (verrattuna, jos toiminnallinen yksikkö olisi 1 kg kaurahiutaletta tai vielä pienempi määrä, kuten kerta-annokseen kuuluva kaurahiutalemäärä). 1000 kg kaurahiutaletta riittää yhteensä 7250 kg:n kaurapuuroerän valmistukseen (reseptillä 4dl kaurahiutaleita, 1 litra vettä, kun kaurahiutaleet painavat 40 g/dl). Ravinteiden kokonaiskäyttötehokkuus on laskettu tuon suuruista, kuluttajien lautasille päätyvää valmista kaurapuuroerää kohden.

Mikäli laskennan tavoitteena on vertailla kahden tai useamman elintarvikkeen ravinnejalanjälkeä, on viisasta ottaa toiminnalliseksi yksiköksi se palvelu tai tarve, joka pyritään kyseisillä elintarvikkeilla tyydyttämään. Pelkkä kilogrammapohjainen tarkastelu ei vertailutilanteessa ole välttämättä ole riittävä, vaan saattaa johtaa vääränlaiseen vastakkainasetteluun erilaisten ravintoarvojen omaavien tuotteiden välillä. Vertailutilanteessa ravitsemukseen perustuva toiminnallinen yksikkö on suositeltavin. Ravitsemusarvon määrittelyä varten eri ravitsemusominaisuudet, kuten energia, vitamiinit, kiennäisaineet jne., olisi periaatteessa arvoitettava, mikä on erittäin vaativaa, vaikkakin esimerkkejä on löydettävissä (Saarinen et al, 2014).

3. Tuotejärjestelmän kuvaus ja laskentamenetelmät

3.1. Tuotejärjestelmän rajaukset

Kuvaan 2 on piirretty tarkasteltavan tuotejärjestelmän elinkaaren vaiheet. Elinkaaren vaiheet ja niissä olevat yksikköprosessit ovat tarkemmin kuvattuna tämän raportin luvuissa 3.3 - 3.12. Kuvassa ne yksikköprosessit, joiden mukana tulee tarkasteltavaan tuotejärjestelmään ravinteita, on merkattu vihreällä taustalla. Punaisilla nuolilla on merkattu huuhtoumat ja haihtumat, joita aiheutuu eri yksikköprosesseissa elintarvikkeen elinkaaren aikana. Ravinteiden päätepiisteet, joissa ravinne katsotaan hukatuksi, on merkattu punaisin laatikoin. Näitä päätepiisteitä ovat käsitellyn jäteveden purku luonnonvesiin, jätteen energiahyötykäyttö, jätteen loppusijoitus kaatopaikalle ja kierrätetyn kompostoinnin ja mädätyksen lopputuotteen hyötykäyttö muussa kohteissa kuin lannoitehyötykäytössä. Mikäli ravinne kierrätetään ja käytetään hyödyksi toisessa tuotejärjestelmässä, huomioidaan ainoastaan se määrällinen osuus, jonka ensimmäinen tuotejärjestelmä tuottaa. Kierrätettyjen ravinteiden hyötykäytön tehokkuutta toisessa tuotejärjestelmässä ei huomioida ensimmäisen tuotejärjestelmän ravinejalanjälkeä laskettaessa, kuten kappaleessa 2.4 Allokointi on esitetty.

Kuvassa on nähtävissä myös ne yksikköprosessit, jotka jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään ihmistyö, mikä on yleinen käytäntö elinkaarimallintamisessa. Koneiden, laitteiden, rakennusten ja infrastruktuurin valmistus sekä elinkaaren ajalla tarvittavien muiden hyödykkeiden kuten wc-paperin valmistus jätetään tarkastelun ulkopuolelle, koska niitä ei välttämättä valmisteta ja käytetä pelkästään kyseisen elintarvikkeen takia, tai niistä ei voida kohdentaa osuutta tarkasteltavalle elintarvikkeelle.

Elintarvikkeen elinkaaren vaiheissa tarvitaan yksittäisiä syötteitä, jotka saattavat sisältää ravinteita, mutta jotka jätetään tarkastelun ulkopuolelle:

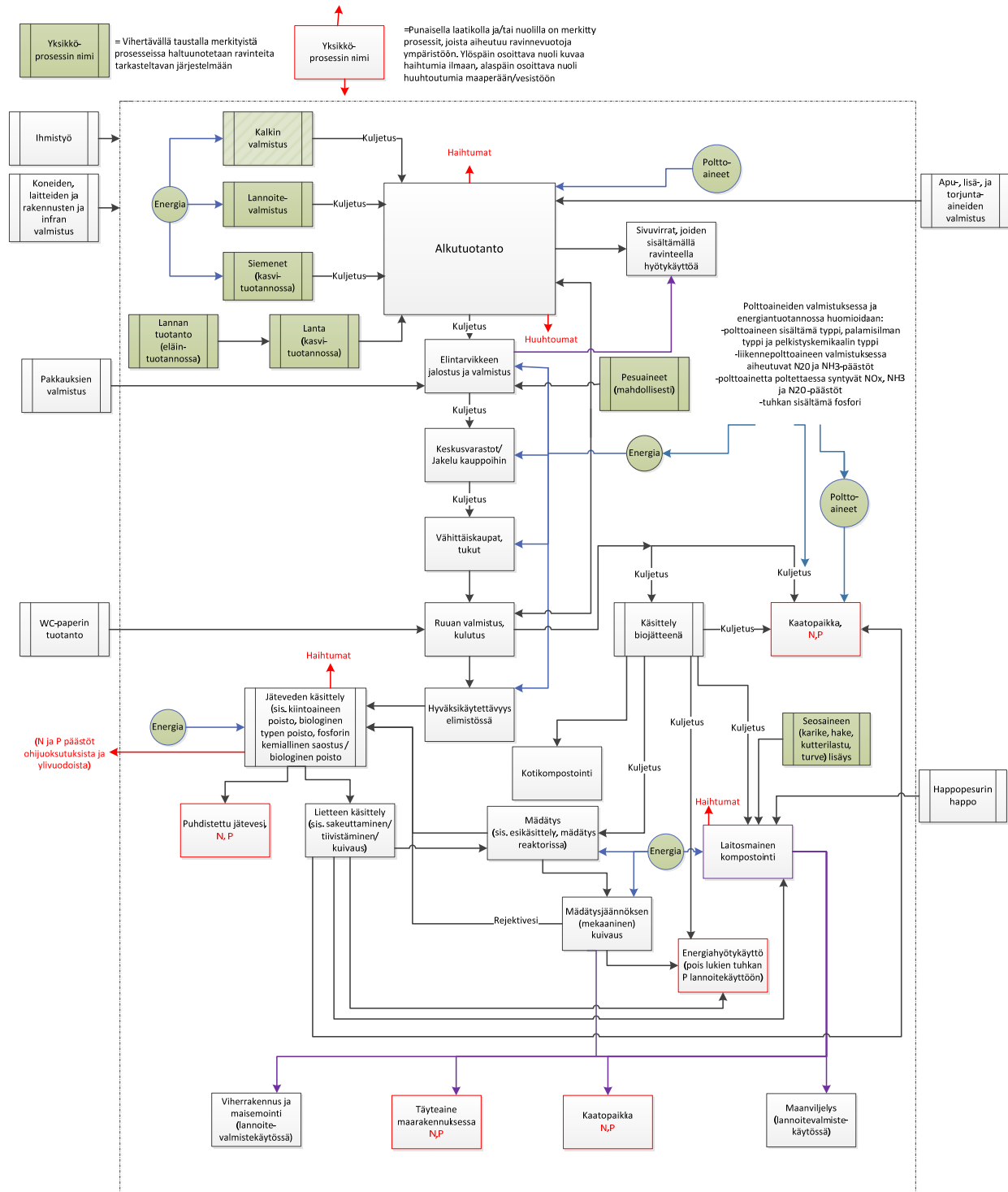
- Pakkaukset voivat sisältää ravinteita, mutta ne jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Pakkauksella on kiinteä rooli elintarvikkeen suojaamisessa ja kuljettamisessa, ja pakkausvalinnalla voidaan vaikuttaa ruokahävikin syntymiseen vähentävästi ja siten myös vaikuttaa elintarvikkeen sisältämien ravinteiden kiertokulkuun. Kuitenkin katsotaan, että pakkauksen valinta ja pakkaus suunnittelu liittyy läheisemmin tuotekehitysnäkökulmaan, joka ei ole ravinejalanjäljen päätarcoitus. Pakkauksen merkitystä elintarvikeketjussa suositellaan kuitenkin tarkasteltavan muilla menetelmillä, kuten elinkaariarvioinnilla, ja selvittämällä, millaisella pakkauksella voidaan minimoida syntyvän elintarvikehävikin määrä.
- Kompostointiprosessin hajukaasupesurin tarvitsema happo saattaa sisältää ravinteita. Ravinmäärät on kuitenkin havaittu niin mitättömiksi, joten ne voidaan jättää huomioimatta ja rajata tarkastelun ulkopuolelle
- Kasvinsuojeluaineet, eläinten lääkkeet, ja muut mahdolliset maataloudessa tarvittut kemikaalit, joiden ravinnesisällöt ovat oletettavasti hyvin pieniä

Elintarvikkeen elinkaaren vaiheissa tarvitaan yksittäisiä syötteitä, jotka sisältävät ravinteita, mutta joista otetaan huomioon vain panoksen ravinnesisältö:

- Pesuaineet, jotka voivat sisältää fosfaattia. Tällöin huomioidaan pesuaineen mukana tarkasteltavaan järjestelmään sisään tuleva fosfori, mutta ei tarkastella pesuaineen valmistusprosessia ja sen tarvitsemia ravinnepanoksia tai energiankulutusta
- Kompostointiprosessissa tarvittava seosaine sisältää typpeä. Tällöin huomioidaan tarkasteltavaan järjestelmään sisään tuleva typpi seosaineen typpipitoisuuden mukaisesti, mutta ei tarkastella seosaineen valmistusprosessia ja sen tarvitsemia ravinnepanoksia tai energian kulutusta.

Tuotejärjestelmän rajauksessa on huomattava ne erityispiirteet, jotka riippuvat siitä, onko tarkasteltava elintarvike eläinperäinen vai kasvipohjainen tuote. Eläinperäistä tuotetta tarkastellessa on tär-

keää sisällyttää lannan tuotanto ja käsittely tarkasteluun mukaan, kun taas kasviperäisessä tuotteessa vain lannan sisältämä ravinteet otetaan tarkastelussa huomioon (mikäli lantaa on käytetty lannoitteena), ja lannan tuotanto ja käsittely jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Lannan tuotanto katsotaan kasviketjussa kuuluvan toisten elintarvikkeiden kuten liha- tai maitotuotteiden tuotantoprosessiin kuuluvaksi ja lanta otetaan tässä tapauksessa kasviketjuun kierrätysravinteeksi toisen tuotantoketjun sivuvirtana.



Kuva 2. Elintarvikeketjun rajaukset ravinnejalanjäljessä

3.2. Tuotejärjestelmän jakaminen elinkaaren vaiheisiin

Tuotanto- ja kulutusketju jaotellaan elinkaaren vaiheisiin, joista kustakin määritetään ravinteiden käytön tehokkuus perustuen kyseisten toimintojen vaatimien ravinteiden käyttöönottoon sekä niiden vaiheen ravinnehäviöihin. Tällöin kunkin osion ravinteiden käytön tehokkuutta voidaan tarkastella osioittain unohtamatta kuitenkaan koko ketjun ravinteiden käytön tehokkuutta. Alla olevaan taulukoon 2 on koottu tutkittavan järjestelmän elinkaaren vaiheet, joista kustakin kuvataan tarkemmat laskentamenetelmät luvuissa 1.3- 3.9.

Taulukko 2. Ravinteiden käytön tehokkuus elinkaarenvaiheittain

| Tunnus | Elintarvikeketjun vaihe |
|-------------------------|--|
| 1 | Alkutuotannon panostuotanto |
| 2 | Kasvintuotanto |
| 3 | Kotieläintuotanto |
| 4 | Elintarvikkeiden jalostus |
| 5 | Elintarvikkeiden jakelu, varastointi ja kauppa |
| 6 | Kulutus |
| 7 | Jätehuolto |
| Vaiheet 1-7 Yhdessä: | Ravinteiden hyödyntämisaste koko ketjun aikana |

Elintarvikeketjun vaiheet voivat sisältää sekä kuljetuksia ja energian käyttöä. Polttoaineiden sekä sähkön ja lämmön tuotannon päästöt ja ravinteiden käyttö, sekä polttoaineiden polton suorat päästöt otetaan huomioon ja sisällytetään elinkaaren vaiheiden (1-7) alle. Energiantuotantoon ja kuljetuksiin liittyvää ravinnelaskentaa käsitellään kuitenkin tarkemmin erillään luvuissa 3.11 ja 3.12.

3.3. Alkutuotannon panostuotanto

Taulukko 3. Ravinteiden luokitus: alkutuotannon tarvitsemien tuotantopanosten valmistus

| Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttöravinteet |
|---|--|--|--|
| Prosessien ja kuljetusten energian kulutus: neitseellisten polttoaineiden ravinteet. Lannoitevalmistus: N input = prosessissa vaaditun energian polttoaineen N + lannoitteen sisältämä typpi Rehujen valmistus: prosessissa vaaditun energian polttoaineen N | Prosessien ja kuljetusten energiankulutus: kierrätyspolttoaineiden ravinteet Rehujen valmistus: kierrätysraaka-aineiden sisältämä typpi | Lannoitevalmistus: prosessissa muodostunut jätevesi ja ilmapäästöt (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) Prosessien ja kuljetusten energiankulutus: ilmapäästöt (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) Rehujen valmistus: prosessien ilmapäästöt (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) ja kiinteän jätteen typpi | Rehujen valmistus: energian tuotantoon käytetyn sivuvirran typpi |
| Lannoitevalmistus: fosforiapatiitti (sisältää lannoitteen sisältämän fosforin + valmistusprosessin häviö = alkuperäinen fosforimäärä) | Rehujen valmistus: kierrätysraaka-aineiden sisältämä fosfori | Lannoitevalmistus: louhitun apatiittifosforin rikastaminen ja puhdistus, lannoitevalmistus: - vesi- / ilmapäästöt - sivuvirtakipsin pitkäaikainen läjitys - sivuvirtakipsin käyttö rakennusteollisuudessa / muualla, missä ravinnearvoa ei hyödynnetä Rehujen valmistus: kiinteän jätteen fosfori | Lannoitevalmistus: kipsivirtojen hyödyntäminen lannoitevalmistuksessa / käyttö maanparannusaineena Rehujen valmistus: energian tuotantoon käytetyn sivuvirran fosfori |
| Kalkin / Kasvinsuojeluaineiden / muiden apuaineiden valmistus: N/P input raaka-aineiden selvityksellä / N energian tarpeen perusteella | Kierrätysraaka-aineet -Sivuvirtakalkki (kuonat mukaan lukien) | Kalkin ja kasvinsuojeluaineiden valmistus: ilma- ja vesipäästöt | |

3.3.1. Panostuotantovaiheen kuvaus

Alkutuotannon panostuotannon ravinnevirrat tarkoittavat epäorgaanisten lannoitteiden, kalkkituotteiden, kasvinsuojeluaineiden, teollisten rehujen sekä muiden mahdollisten lisä- tai apuaineiden sisältämiä ravinnevirtoja sekä niiden valmistusta varten haltuun otettuja ravinnevirtoja. Ravinnelaskenta perustuu viljelijän tai kotieläintuottajan tekemiin lohkokohtaisiin merkintöihin epäorgaanisten lannoitteiden ja muiden teollisten apuaineiden määristä sekä kotieläinten rehujen hankintatiedoista. Kyseisistä tuotteista lannoitteiden, rehujen ja kasvinsuojeluaineiden ravinnevirrat ovat merkittäviä. Muiden apuaineiden ravintosisältö jätetään huomiotta, sillä niiden mahdollisesti sisältämät ravinnepitoisuudet ovat minimaalisen pieniä. Teolliset kalkkituotteet sisältävät harvoin ravinteita, mutta sivuvirtakalkki saattaa sen sijaan sisältää niitä, joten kalkkituotteiden ravinnesisältö otetaan huomioon.

Valmistusprosesseista huomioidaan lannoitteiden, kalkin, teollisten rehujen ja kasvinsuojeluaineiden valmistus saatavilla olevien tietojen perusteella. Lannoitevalmistuksessa fosforin suhteen on huomioitava etenkin fosforin louhinnasta, rikastamisesta ja lannoitevalmistuksesta aiheutuneet hä-

vikkivirrat. Kokonais- käyttöön otettu fosfori lasketaan täten: lannoitteiden sisältämä fosfori + prosessissa hukatut fosforivirrat = alkuperäinen tarvittu fosforimäärä. Suomessa epäorgaanisten typpilannoitteiden valmistus perustuu tuontienergiaan, mikä tarkoittaa käytetyn primaaritypen osalta prosessissa tarvittua energiaa polttoaineen sisältämää tyyppiä.

Teollisten lannoitteiden valmistus koostuu useista osaprosesseista, minkä takia reaalityön saaminen tarvituista neitseellisistä ravinnepanoksista kuin myös prosessissa hukatuista ravinteista esim. 1 kg tiettyä lannoitevalmistetta kohti on haastavaa. Maailmanlaajuisen lannoitejärjestö IFA: toimeksiannosta tehdyssä selvityksessä Prud'Homme (2010) arvioi, että fosforilannoitteiden valmistuksessa fosforijakeiden häviöt ovat keskimäärin louhinta- ja rikastusvaiheessa 18 %, ja lannoitevalmistus- ja jakeluprosesseissa 16 %. Ellei prosessikohtaisia tietoja ole saatavilla, käytetään kyseistä IFA:n globaalia arviota fosforin hävikkivirroista.

Kalkki- ja kasvinsuojeluainevalmistuksen osalta typen ja fosforin käyttöönottomäärät perustetaan energian tuotannon polttoaineiden ravinnepitoisuuksiin siltä osin, kun energiatietoa on saatavilla prosesseista. Kalkin valmistus perustuu louhittuun kalkkikiveen. Kalkkikiveä voidaan käyttää sellaisenaan murskattuna tai edelleen jalostettuna kalsiumoksidiksi (poltettu kalkki) tai kalsiumhydroksidiksi (sammutettu kalkki), jolloin sen reaktiivisuus lisääntyy, ja se pystyy sitomaan enemmän epäpuhtauksia itseensä. Nordkalk on yksi Suomen ja Pohjois-Euroopan merkittävimpiä kalkkituotteiden valmistajia. Yhtiö ilmoittaa ympäristöraportissaan mm. polttoainejakauman, mitä energian tuotantoon on käytetty, mutta ei kulutettua energiaa määrää kalkkituotteita kohti. Typen ilman päästöiksi yhtiö ilmoittaa: 0,07-0,08 kg NO_x / louhittu kalkkikivitonni (Nordkalk 2012).

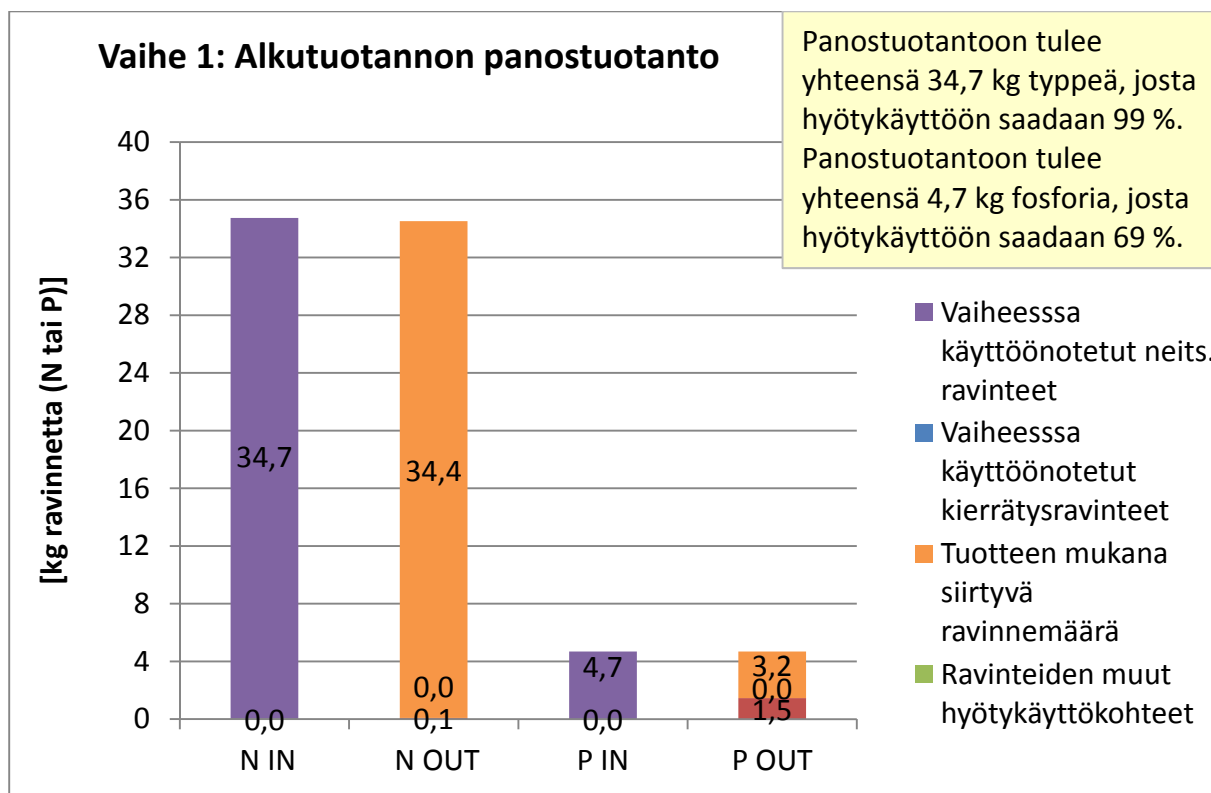
Kasvinsuojeluaineiden valmistus on todettu olevan hyvin energiaintensiivistä, mutta tietoa ei ole helposti saatavilla. Esimerkiksi Helsel ym. (2013) ovat tutkineet tunnetuimpien kasvinsuojeluaineiden valmistusta. Julkaistujen tietojen perusteella laskettiin, että glyfosaatin tuotanto 1 kg / ha vaatii 1272 MJ energiaa. Koska valmistusprosessi perustuu öljyn käyttöön, valmistuksen vaatima ravinteiden käyttöön otto sekä ravinnehäviöt voidaan selvittää sitä kautta. Käytetystä öljystä 80 % arvioitiin kuluvan prosessienergiانا (Virtanen 2014).

Koska Suomessa myytyjen epäorgaanisten lannoitteiden Yaran markkinaosuus on noin 95 %, käytetään suoraan valmistajalta saatuja lannoitevalmistustietoja: Typen käyttöönotto- ja häviömääriin käytetään lannoitevalmistajan toimittamia tietoja energiapanoksista sekä typen ilmapäästöistä. Fosforin suhteen on koettu haastavaksi laskea fosforihävikkivirrat valmistaa lannoitekiloa kohti, joten käytetään globaaleja keskimääräisiä arvioita (kuvattu yllä; Prud'Homme 2010).

Kalkkivalmistajalta on saatu prosessin ilmanpäästötiedot (NO_x) tuotettua kalsiumkarbonaattikiloa kohden, jonka määrä kertoo samalla tarvittujen typpiravinteiden käyttöönoton prosessissa (koska energiatietoja ei ole saatavilla). Typen käyttöönotto lasketaan ylläpitokalkituksen 400 kg/ha/v mukaan. Kasvinsuojeluainevalmistuksen energian käyttö laskettiin vain glyfosaatille suositusmäärän 1 kg/ha mukaisesti olettaen, että käytetty polttoaine oli öljyä, kuten se yleensä on (Helsel ym. 2013).

Teollisten rehujen valmistajia ja rehut tuotteita on Suomessa monia ja rehujen koostumukset, valmistuksessa käytetyt raaka-aineet sekä valmistustavat vaihtelevat paljon. Siksi olisi suositeltavaa käyttää ravinnevirtojen laskemiseen tarkasteltavaan ketjuun liittyviltä valmistajilta saatuja määrä- ja pitoisuustietoja raaka-aineista, tuotteesta, hyödynnettävistä sivuvirroista ja kiinteistä jätteistä.

3.3.2. Panostuotantovaiheen tulokset



Kuva 3. Alkutuotannon panostuotanto

Alkutuotannon panostuotannon käyttöönotetut ravinteet muodostuvat kasvintuotannossa miltei kokonaan lannoitteen sisältämästä typestä, joka on suurimmaksi osaksi peräisin siis ilman N₂:sta, sekä lannoitteen sisältämästä fosforista (kuva 3). Tämän lisäksi pieni määrä ravinteita sisältyy lannoitevalmistuksessa tarvittuihin polttoaineisiin, sekä typen osalta kalkkiin ja kasvinsuojeluaineiden valmistukseen.

Fosforin kohdalla huomataan, että fosforin louhinnasta, rikastuksesta ja lannoitevalmistuksesta aiheutuvat hävikit alentavat fosforin hyötykäyttöastetta. Typellä häviöt ovat pienempiä, ja ne johtuvat lähinnä lannoitevalmistuksen ilmapäästöistä.

3.4. Kasvintuotanto

Taulukko 4. Ravinteiden luokitus: Kasvintuotanto

| Siirtyvät ravinteet | Neitseelliset ravinteet | Kierrätys-ravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttö-ravinteet |
|---|--|--|---|---|
| Epäorgaaniset lannoitteet (todellinen ravinnemäärä edellisen kappaleen perusteella) | Biologisen typen sidonnan typpi | Eläimen lanta, muut orgaaniset lannoitteet | Pelloilta tapahtuneet huuhtoumat - Typpi: NO ₃ , NH ₄ , org.N - Fosfori: fosfaatti (P ₂ O ₅), org.P | Korjattu sato ravitsemuskäyttöön |
| Teolliset kalkki-tuotteet | Maaperän varastosta saatu fosfori | Siemenet, peltoon jätetty kasvimassa | Kivennäis- ja savi-maat: Lannoituksen (epäorg./org) lisäyksestä aiheutuneet haihtumat: NH ₃ , suora N ₂ O, NO _x , N ₂ | Oljet, muu kasvimassa (hyöty kohdistuu muulle kasville) |
| Sivuvirtakalkki-tuotteet | | | Orgaaniset maat: lannoituksesta, orgaanisen aineksen (turpeen hajoamisesta) ja kasvin tähteistä aiheutuneet haihtumat: N ₂ O | Orgaanisen lannoitteen liukoisen typen / fosforin hyötyosuus muille kasveille, kun huuhtoumat ja haihtumat vähennetty (viljelykierto-tarkastelujaksona) |
| | | | Epäsuora N ₂ O-haihdunta huuhtoumista ja NH ₃ - sekä NO _x - haihdunnan laskeumasta aiheutuen | Orgaanisen lannoitteen liukoisen typen / fosforin hyötyosuus muille kasveille, kun huuhtoumat ja haihtumat vähennetty (tarkastelujakson jälkeen) |
| | Lannoitteiden sisältämien neitseellisten ravinteiden tarkastelu-vuotta edeltävinä vuosina käyttämättä peltolohkolle jääneet tarkasteluvuonna käyttöön otetut ravinteet | | Epäorgaanisen lannoitteen / orgaanisen lannoitteen tai biologisen typensidonnan tuottamat tarkasteluvuonna käyttämättä peltolohkolle jäänyt ravinneosuus minera-lisaation mukaista laskentaa käyttäen | |
| | Kuljetusten energiankulutus | Kuljetusten energiankulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Polttoainetta poltettaessa syntyvät pako-kaasupäästöt (NO _x , N ₂ O ja NH ₃) | |

3.4.1. Kasvintuotantovaiheen kuvaus

Ravinnepitoisuudet alkutuotannossa:

Viljeltävien kasvien ravinnepitoisuuksilla on oleellinen merkitys tulosten oikeellisuudessa. Viljeltäville kasveille suositellaan käytettävän MTT:n tuottamia julkista rehutaulukkoa, jota päivitetään säännöllisesti, ja mikä toimii virallisena ruokintasuosituspohjana. Saatavilla:

<https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Rehutaulukot>.

Viljellyn kauran ravinnepitoisuudet: Rehutaulukossa on annettu typpipitoisuuden sijasta vain raakaproteiinipitoisuus. Typpipitoisuus laskettiin jakamalla raakaproteiinin määrä luvulla 6,25, jota käytetään yleisesti muuntokertoimenä typen ja proteiinipitoisuuden välillä. Ravintoarvot on lisäksi ilmoitettu tuotteen kuiva-ainepitoisuutta kohti, mutta muunnettavissa tuorepainoa kohti ilmoitetun kuiva-ainepitoisuuden avulla. Näin saatiin viljellyn kauran N-pitoisuus: 0,018 kg N / kg kauraa ja fosforipitoisuus 0,0344 kg P / kg kauraa.

Tiedon keruu / hallinta

Tiedon hakua varten on tunnistettava, mitä ravinnejalanjälki-laskennalla halutaan saavuttaa. Case-ketjukohtaisessa tarkastelussa viljelytietojen saanti kohdennetaan niin, että se saadaan ketjun todellisilta toimijoilta, eli esim. elintarviketuottajan kautta sopimusviljelijöiltä. Määritettäessä ravinnejalanjälkeä kansallisella tasolla, esim. "suomalaisen kaurahiutaleen valmistus", viljelytieto voidaan hankkia alueellisesti maataloustietoja keräävien tahojen kautta, kuten ProAgrian kautta. Joka tapauksessa case-tyyppisen tiedon, tai alue- / kansallistason viljelytiedon on perustuttava lohkokohtaiseen tiedonkeruuseen, sillä tilan kukin lohko voi olla toiminnaltaan erilaiset, ja kustakin lohkoista pidetään omaa lohkokorttia.

Kaurahiutale-laskennassa viljelytiedot saatiin Raisio Oyj:n sopimusviljelijöiden kautta. Viljelytiedot perustuvat lohkokohtaisiin merkintöihin viljelytoimenpiteistä. Laskenta perustuu 3 vuoden viljelyjaksoon, josta laskenta suoritettiin vuosittaisten lohkotietojen perusteella.

Ravinnejalanjälkilaskenta kasvinviljelyssä

Kasvinviljelyn ravinnejalanjälkilaskentaan otetaan huomioon taulukossa 4 kuvatut ravinteet. Alkutuotannon tuotantopanoksilla tarkoitetaan tuotannon harjoittamiseen vaadittuja panoksia, joita ovat lannoitteet (epäorgaaniset sekä orgaaniset lannoitteet, lanta mukaan lukien), siemenet, kasvinsuojeluaineet, kalkkivalmisteet, energian ja liikennöinnin vaatimat panokset sekä muut mahdolliset apuaineet. Kasvinsuojeluaineiden, ja muiden apuaineiden mahdollisia ravinnesisältöjä ei tässä huomioida, koska oletettavasti niiden ravinnepitoisuudet ovat olemattomat. Myös ilmakehän ravinnelaskeumat päätettiin rajata tästä laskennasta ulkopuolelle, sillä ketjun toimintaa tehostamalla ei voida vaikuttaa laskeuman suuruuteen.

Ravinnejalanjälki lasketaan kasvinviljelyssä lähtökohtaisesti vuoden ajanjaksolle kerrallaan. Vuosikohtaisesta vaihtelusta johtuen on kuitenkin suositeltavaa, että tarkasteltava jakso on kokonaisuudessaan 3-5 vuotta, jolloin laskenta perustuu kyseisten vuosien keskiarvoon. Mikäli tutkittavaa kasvia viljellään osana viljelykiertoa, jossa lannoitus perustuu kasvinvuorotuksen hallintaan, on perusteltua tarkastella valittuja vuosia pidemmällä aikavälillä kuin vuosiperusteisesti. Vuosiperusteisessa laskennassa mahdollinen esikasvivaikutus jätetään huomiotta, sillä viljelytiedoista ei ilmene, onko lannoitustasossa otettu esikasvivaikutus huomioon vai ei. Koska maahan varastoituneet ravinteet määritetään vuositason tarkastelussa hukatuiksi ravinteiksi, vuosiperusteisessa tarkastelussa ei voida myöskään tarkasteltavan ottaa kasvin jättämää mahdollista lannoitusvaikutusta huomioon, koska sen mahdollista hyötyä seuraavana vuonna ei voida osoittaa. Näin ollen tarkoituksellisesti ravinteita maahan kerryttäessä (luomuviljelyn viherlannoitusvuosi) tai varastoitaessa (viljelykierron jälkivaikutusravinteet) on välttämätöntä tarkastella ravinteiden käytön tehokkuutta vähintään kahden vuoden aikaperspektiivillä ja orgaanisten ravinteiden osalta mineralisaatioaika huomioiden

Kasvintuotannossa neitseellisiksi ravinteiksi luokitellaan teollisten lannoitteiden ravinteet (alkuperäinen neitseellinen ravinnemäärä), biologisen typen sidonnan kautta tullut typpi sekä maaperän varastoista otettu fosfori. Tilanteita, joissa maaperästä tuleva ravinneosuus tulee laskennassa esille, ovat ne lohkot, joiden ravinnetase on negatiivinen. Tällöin kasvin sisältämä ravinnesisältö on suurempi, kuin mitä tunnetut ravinnepanokset peltoon ovat. Edellisen vuoden tai joidenkin edellisten vuosien laskennassa vastaava ravinnemäärä on kuitenkin ilmentynyt hävikkinä ja siten rahinteiden heikompana käyttöönottohetokkuutena. Lisäksi uutta ravinnetta otetaan ketjussa käyttöön peltoöiden vaatiman polttoaineiden kulutuksen sekä ravinnepanosten hankinnan vaatiman liikennöinnin takia.

Kierrätysravinteiksi luokitellaan sen sijaan siementen, lannan sekä muiden orgaanisten lannoitevalmisteiden sisältämät ravinteet. Suomen maatalosta yli 90 % kuuluu ympäristötukijärjestelmään, mikä tarkoittaa, että orgaanisten lannoitteiden levitysmäärät määräytyvät maaperän ominaisuuksien sekä ympäristötukiohjeissa määritetyn hyväksikäyttöprosentin perusteella. (Mavi 2007) Ravinnejalanjälkilaskennassa otetaan kuitenkin huomioon orgaanisten lannoitteiden kokonaisravinnepitoisuudet käyttöön otetuiksi, sillä kaikki lisätty ravinne on mahdollista siirtyä kasviin tai huuhtoutua tai haihtua luontoon

Ravinnehäviöt

Typhen ja fosforin häviöt kasvinviljelyssä perustuvat pellolle lisätystä lannoitteesta tapahtuviin typhen ja fosforin huuhtoumiin sekä typhen haihtumiin. Häviöitä tapahtuu sekä epäorgaanisesta että orgaanisesta lannoitteesta. Epäorgaanisen lannoitteen ajatellaan olevan samana vuonna täysin kasvien käytettävissä, joten siitä lasketaan vain tarkasteltavan vuoden ravinnehäviöt. Myös yksivuotisessa tarkastelussa lannan loppuosuus (lannan kokonaisravinteista vähennetty kasvin ottamat ravinteet, huuhtoutuneet ja mahdollisesti haihtuneet ravinteet) lasketaan menetetyksi ravinteeksi, sillä ei voida tietää, miten seuraavan vuoden lannoitustasossa otetaan kyseinen lantaosuus huomioon.

Orgaanisessa muodossa olevat ravinteet ja mineralisaatio

Orgaanisen lannoitteen kohdalla ravinteiden häviöt määritetään aika-arvion mukaan: aika, jonka kuluessa orgaanisen lannoitteen oletetaan mineralisoituneen, eli hajonneen epäorgaaniseen muotoon kasvien käytettäväksi. Mineralisoituneet ravinteet ovat alttiina myös ravinnetappioille, joten koko mineralisaatioajanjaksolla kullekin vuodelle lasketaan ravinnetappiot (huuhtoumat ja haihtumat). Loppuosuus mineralisaatiosta voidaan katsoa olevan hyödyllistä muille kasveille eli olevan hyötykäyttöravinnetta (otetaan huomioon kokonaishyötykäyttölaskennassa). Viljelykierto tulisi huomioida, koska sen merkitys viljalyn ravinnetaseiden hallinnassa on luomussa suurempi kuin tavanomaisessa viljelyssä.

Typhen ja fosforin huuhtoumat lasketaan tilastomalleihin perustuvilla lohko-kohtaisilla huuhtoumamalleilla. Huuhtoumamalli on kuvattu raportissa: Aterioiden ja asumisen valinnat kulutuksen ympäristövaikutusten ytimessä, ConsEnv -hankkeen loppuraportti (Saarinen ym. 2011).

Typhen haihtumat lasketaan sen sijaan seuraavasti: Dityppioksidin (N_2O) haihdunta kasvinviljelyssä, sekä suora että epäsuora lasketaan perustuen IPCC:n haihduntaohjeisiin sekä kansallisesti muodostettuihin haihduntakertoimiin. Haihduntamenetelmät on kuvattu MTT:n hiilijalanjälkilaskentaohjeistuksessa (Pulkinen ym., 2012).

Ammoniikki-haihdunta pellolle levitetyistä lannoiteista perustuu Suomen oloihin muokattuihin haihduntakertoimiin. Lannan levityskertoimet perustuvat lantatyyppeihin (neste / kiinteä / kuivikkeita mukana), sekä lannan levitystapaan (Grönroos ym. 2009). Mikäli viljelijän luovuttamista tiedoista ei ilmene lannan levitystapa, käytetään tilastointiin perustuvia levityskertoimia, jotka perustuvat kansalliseen tapaan levittää kutakin lantaa (taulukko 5; Grönroos ym., 2009; Maatalouslaskenta 2010). Mikäli lantatyyppeikään ei ole tiedossa, käytetään IPCC:n määrittämää lannan typhen karkeaa NH_3 -haihdunta-kerrointa 25 % (Pulkinen ym. 2012).

Taulukko 5. Lannan levityksen aiheuttama NH₃-haihdunta: luvut ovat kertoimia eri lantatyypeille, joilla kertomalla lannan pitoisuus kussakin levitystilanteessa saadaan laskettua typen haihtuminen ammoniakki-muodossa (NH₃-N). (Lähteet: Grönroos ym., 2009; Maatalouslaskenta 2010).

| NH ₃ -haihdunta lannan tyydestä, % | | | |
|---|-------|-------|----------|
| Lietelanta | Nauta | Sika | Broileri |
| sijoitus suoraan maan sisään | 7,50 | 7,01 | 7,50 |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä < 4 h) | 16,25 | 15,18 | 16,25 |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä 4-12 h) | 33,13 | 30,94 | 33,13 |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä > 12 h) | 43,75 | 40,86 | 43,75 |
| Pintalevitys, ei multautusta | 50,00 | 46,70 | 50,00 |
| Matilda, keskimääräinen levitystapa | 26,04 | 24,32 | 26,04 |
| Kiinteä lanta | | | |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä < 4 h) | 9,75 | 9,75 | 9,75 |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä 4-12 h) | 19,88 | 19,88 | 19,88 |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä > 12 h) | 26,25 | 26,25 | 26,25 |
| Pintalevitys, ei multautusta | 30,00 | 30,00 | 30,00 |
| Matilda, keskimääräinen levitystapa | 19,70 | 19,70 | 19,70 |
| Virtsa / lantavesi | | | |
| sijoitus suoraan maan sisään | 4,01 | 4,01 | |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä < 4 h) | 8,68 | 8,68 | |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä 4-12 h) | 17,69 | 17,69 | |
| pintalevitys ja multaus (levityksen ja multauksen väli- lä > 12 h) | 23,36 | 23,36 | |
| Pintalevitys, ei multautusta | 26,70 | 26,70 | |
| Matilda, keskimääräinen levitystapa | 22,02 | 22,02 | |

Mikäli sadon sisältämän ravinnepoistuman ja todettujen ravinnehäviöiden yhteenlaskettu summa ei ole sama kuin pellolle lisättyjen ravinteiden summa, on oletettava, että loppuosuus ravinteista on myös hukattu ravinteita, joita ei ole dokumentoitu. Kasvinviljelyssä vain pellolta korjatun sadon osuus on toivottua hyötykäyttöä ravinteille.

Hyötykäyttöravinteet

Ylemmän tason hyötyastetta laskettaessa (elintarvikeketjun päätavoite, *tässä: kaurahiutaleen tuotaminen*) hyötykäyttöravinteiksi lasketaan vain viljeltyyn kauraan siirtyvät ravinteet. Sen sijaan käyttöön otettujen ravinteiden kokonaishyötyastetta laskettaessa otetaan huomioon lannoituksesta muiden kasvien käyttöön jäävä osuus, mikä saadaan, kun lannoitteesta vähennetään typen haihduttapioit, huuhtoutuneet typen ja fosforin osuudet sekä kasvin ottama ravinneosuus.

Epäorgaanisten lannoitteiden osalta oletetaan, että kaikki ravinteet tulevat käyttöön tarkasteltavana vuonna, sillä ne ovat helposti liukenevassa muodossa. Orgaanisissa lannoitteissa käytetään sen sijaan aika-arviota, jonka kuluessa orgaanisen lannoitteen oletetaan mineralisoituneen, eli hajonneen epäorgaaniseen muotoon kasvien käytettäväksi. Laskennassa tehtiin oletus, että eläimen lannan oletettiin hajoavan jo levitysvuonna (1-vuoden tarkastelu) tai pidemmällä viljelykiertotarkastelujaksolla. Sen sijaan vaikeammin liukoiset orgaaniset ravinteet voidaan luokitella liukoisuusryhmiin, ja pyrkiä määrittämään niille liukoisuusajat ja näitä käyttäen arvioida niiden vuosittaiset käyttöön tulevat määrät.

Ravinnejalanjälki-laskenta viljelykierto-viljelyssä

Viljelykierron ravinnetalouteen liittyy erityispiirteitä, joita on syytä tarkastella tarkemmin ravinnejalanjälkeä laskettaessa: 1) ravinteita annetaan harvemmin kuin vuosittain; 2) viljelyssä/lannoituksessa yleensä jokin säännönmukaisuus/jaksollisuus (viljelykierto); 3) ravinteiden kemiallinen muoto harvoin liukoinen - joko orgaanista materiaalia tai mineraaliainesta (kivijauheet, yms.); 4) maan varastopooli myös aktiivisessa käytössä; 5) biologinen typensidonta.

Kaikista edellä mainituista seikoista johtuen viljelykierron näkökulmasta on mielekästä tarkastella yhtä yksittäistä vuotta ravinnejalanjäljen määrittämiseksi vain poikkeuksellisesti. Pidemmän jakson tarkastelu on lähes aina välttämätöntä, mutta jakson pituus on toisinaan hankala määrittää: viljelykierto ei ole aina säännönmukainen. Toisekseen pitkävaikutteisten lannoitusaineiden (kivijauheet, tuhkat) käyttö voi toistua erittäin harvoin (>5 vuotta). Ravinteiden hidasvaikutteisuus ja niukkaliukoisuus sekä maan varastopoolin hyväksikäyttö otetaan laskennassa huomioon: esim. kilo fosforia apattiittijauheena ei ole suoraan verrannollinen lannan muodossa annettuun fosforikiloon. Biologisen typensidonnan osalta tuloksiin liittyy aina arvionvaraisuutta.

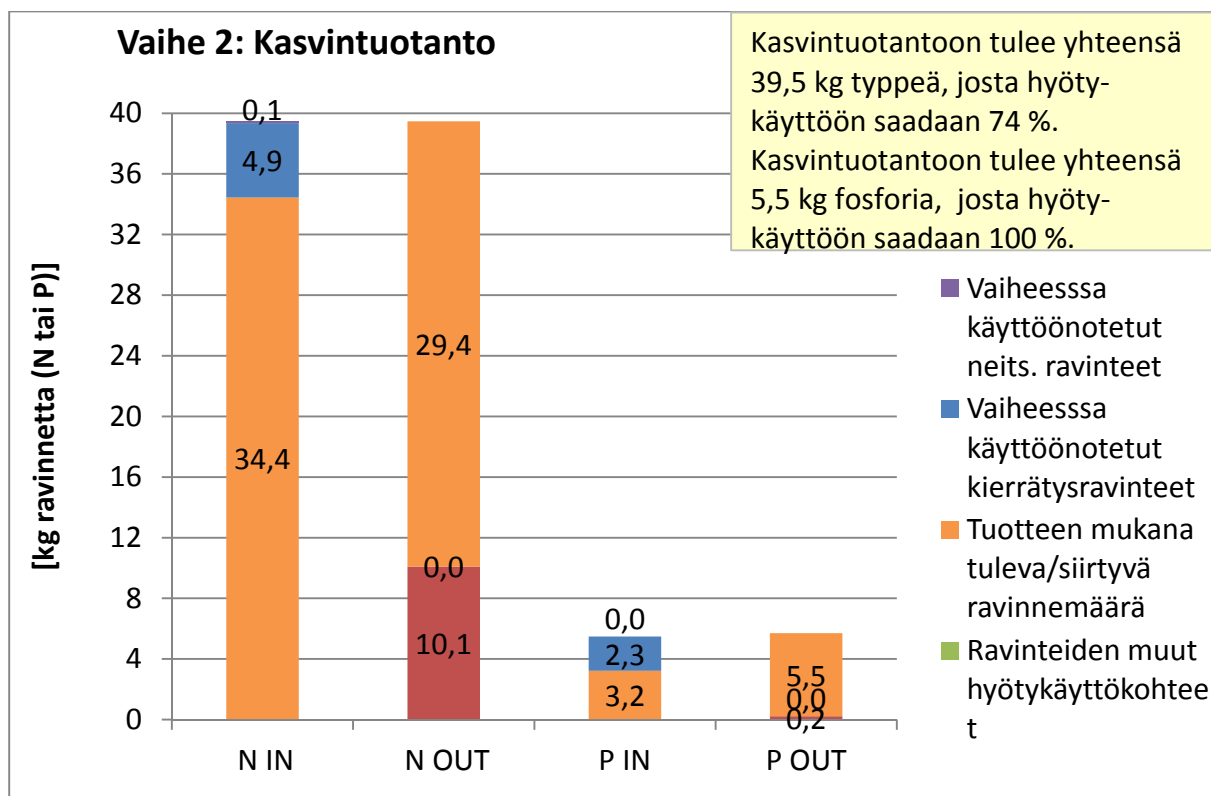
Laskentavaiheet:

1. valitaan tarkasteltava aikajakso, joka ensisijaisesti on viljelykierron mittainen
2. ellei muuta kohdentamisperustetta voida perustella, kohdennetaan kaikki valitun tarkastelujakson ravinnepanokset tasan kullekin vuodelle (paitsi karjanlannan mukaan tuleville fosforiravinteille, joiden kohdennusta tarkastellaan viljelykierron vuosittain ympäristötukiehtojen esittämällä tavalla²)
3. arvioidaan niukkaliukoisten ravinteiden ja varastopoolin käyttö (varasto joko lisääntyy tai vähenee), ja esitetään arvio tarkastelujakson mittaisena, esim. 1 kg kivijauheena annettu kokonaisfosfori ei ole suoraan verrannollinen lannan muodossa annettuun 1 kg fosforia: arvioidaan, mikä osa tästä on liukoista tarkastelujaksona)
Arvioidaan neitseellisten ravinteiden määrä koko arviointijaksolla: biologisen typen sidonta, apattiittijauhe,
Arvioidaan kierrätysravinteiden määrä koko arviointijaksolla: orgaaniset ravinteet (lanta, maaperästä otettu fosfori-osuus)
4. biologisen typensidonnan arviointi: Typensidonnan määrän arviointi tapahtuu tarkempien tietojen puuttuessa yleiseen kaavaan: biologisen typensidonnan (=BTS) osuus palkkasvin talteen korjatun sadon kokonaistypestä + BTS osuus palkkasvin talteen korjaamattomasta sadosta.

² http://www.mavi.fi/fi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelija/Documents/Ravinnetaseohje_2008.pdf

Luomulaskentaa ei esimerkkilaskennan yhteydessä suoritettu, koska saatu viljelydata kolmelta vuodelta sisälsi alle 20 luomulohkoa. Näistä lohkoista ei ollut saatavissa viljelyhistoriaa, minkä takia laskenta olisi jäänyt yhden vuoden varaan. Näillä perusteilla ei voida viljelykiertolaskentaa toteuttaa.

3.4.2. Kasvintuotantovaiheen tulokset



Kuva 4. Kasvintuotantovaiheen tulokset

Tuotteen mukana tuleva ravinne tarkoittaa kasvintuotannossa lannoitteen sisältämää ravinnetta, joka siirtyy alkutuotannon panostuotantovaiheesta tähän vaiheeseen. Lannoite muodostaakin suurimman osan kasvintuotantovaiheeseen tulevasta ravinnevirrasta (kuva 4). Tämän lisäksi kasvintuotantovaiheeseen tulee kierrätysravinteina siemeniä ja lannoitteena käytettävää lantaa.

Ravinnepäästöjen suurin yksittäinen aiheuttaja johtuu typpihuuhtoumasta, joka vastaa noin puolta typen ravinnepäästöistä. Typen osalta ravinnepäästöjä syntyy myös kun typpi haihtuu erilaisina yhdisteinä ilmaan. Merkittävin päästölähde typen haihdunnan osalta ovat typpilannoitteiden levietyksessä syntyvät N_2O -päästöt.

3.5. Kotieläintuotanto

Taulukko 6. Ravinteiden luokitus: Kotieläintuotanto

| Siirtyvät ravinteet | Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttöravinteet |
|---|--|---|---|--|
| Jyvät, siemenet, puristeet, rouheet | | Kasvipäriset sivutuotteet suoraan tuottajalta kuten mäski, rypsiakku ja jauhot ja olki | Lannan (ja virtsan) typen häviöt eläinsuojista ja lantavarastosta: NH ₃ ja N ₂ O (suorat päästöt) | Eläintuotteet, jotka päätyvät ravitsemuskäyttöön |
| Teolliset rehut rehujen valmistajilta | | Eläinperäiset sivutuotteet suoraan tuottajalta, kuten kalaruotojauho, hera, teurasjäte | Laidunnukselta aiheutuneet ravinnetappiot: NH ₃ , N ₂ O (suorat ja epäsuorat), ravinnehuuhtoumat | Lannoitteeksi päätyvä lanta (lannan typiravinteista vähennettävä varastoinnin aikaiset haihduntatappiot) |
| - Tuore nurmi, vihantakasvustot ja laidun - heinät ja keino-kuivatut nurmirehut - nurmisäilörehut (sisältäen nurmipalokasvit) | | | | Prosessoinnin (esim. biokaasutus) kautta ravintoketjuun päätyvä lanta (lannan N-ravinteista vähennettävä tilalla tehtävän lannan käsittelyn ja varastoinnin aikaiset haihduntatappiot) |
| Rakennusten lämmityksen ja kuljetusten energian kulutus (ostopolttoaineilla tuotettu osuus) | Rakennusten lämmityksen ja kuljetusten energiankulutus (omilla varsinaisilla poltto-aineilla (puu) tuotettu osuus) | Rakennusten lämmityksen ja kuljetusten energiankulutus (omilla kierrätyspoltto-aineilla tuotettu osuus) | Polttoainetta poltettaessa syntyvät pakokaasupäästöt (NO _x , N ₂ O ja NH ₃) | |

3.5.1. Kotieläintuotantovaiheen kuvaus

Eläinten rehujen ravinnepitoisuudet perustetaan MTT:n julkistamiin rehutaulukoihin. Syntyneen lannan ravinteiden laskentamenettely riippuu siitä, mihin yhteyteen ravinnejalanjälkeä ollaan laskemassa.

Esimerkiksi tuotteen elinkaarista ravinnejalanjälkeä ja sitä yleistetympiä tarkasteluja varten riittää lantataulukoiden antamat arvot (tilan itse teettämä lanta-analyysi / tilastolliset lantataulukot). Sen sijaan esimerkiksi maidon tai lihan tuottajan oman tuotannon (cradle-to-gate) laskentaan suositellaan ruokintaan ja tuotoksiin perustuvaa laskentaa, ainakin sellaisille tuottajille, jotka huolehtivat eläintensä hyvinvoinnista ja tuotantokykyisyydestä.

Teollisten rehujen valmistuksessa käytetään viljaa ja elintarvikeketjun sivuvirtoja. Viljan sisältämät ravinteet käsitellään kasvintuotannosta siirtyvinä ravinteina. Sivuvirtojen mukana systeemiin kulkeutuvat ravinteet käsitellään kierrätysravinteina. Rehunvalmistuksen ravinnehäviöt muodostuvat polttoon ja jätteeksi menevien virtojen sisältämistä ravinteista sekä energian tuotannosta syntyvistä savukaasupäästöistä (NO_x , N_2O ja NH_3).

Eläinten hyödyntämät ravinteet lasketaan MTT:llä muodostettujen eläinmallien perusteella, jossa lannan sisältämät ravinteet lasketaan eläimelle syötettyjen rehujen ravinnepitoisuuksien mukaan. Mallien antamien tulosten mukaan suomalainen lypsylehmä syö rehun mukana 176,5 kg typpeä ja 28,9 kg fosforia vuodessa (Nousiainen, 2014, suullinen tiedonanto). Tuotteisiin siirtyy tyypeä 46,3 kg ja fosforista noin 8,2 kg. Eniten ravinteita päätyy maitoon, eli 44,3 kg typpeä ja 7,7 kg fosforia. Typen ylijäämä, 130,2 kg, poistuu eläimestä sonnan ja virtsan mukana. Fosforiylijäämää poistuu vastaavasti 20,7 kg. Maidolle ja lihalle kohdistuvat ravinnemäärät riippuvat menetelmästä, jolla eläimen ylläpidon entalpia jaetaan näiden rinnakkaistuotteiden kesken. Biologista allokaatiota käyttäen saadaan typen häviöille arvot 11,4 g/kg maitoa ja 157,4 g/kg elopainoa ja fosforille 1,4 g/kg maitoa ja 17,7 g/kg elopainoa (Virtanen, 2014, HierarchyNet hankkeen seminaari). Huomattakoon, että yhdestä kilosta elopainoa saadaan noin 500 g teurastettua painoa.

Suomalaisen emolehmän typen sisäänotto on 79,4 kg ja fosforin 14,3 kg (Nousiainen, 2014, suullinen tiedonanto). Tuotteisiin siirtyy tyypeä 10,2 kg ja fosforista noin 1,9 kg. Maitoon päätyy 8,6 kg tyypeä ja 1,5 kg fosforia. Lannassa poistuva typen ylijäämä on 69,3 kg ja fosforin ylijäämä 12,4 kg. Maito käytetään yleensä kokonaan vasikoiden ruokintaan. Täten allokoiteja ei tarvita, vaan kaikki panokset ja tuotokset mukaan lukien ravinnehävikit kohdistuvat lihalle.

Lihaska saa elinaikanaan syömänsä ravinnon mukana vastaavasti 7,7 kg tyypeä ja 2,5 kg fosforia. Eläimeen pidättyy tyypeä 3,1 kg ja fosforista 1 kg. Typen ylijäämä, 4,6 kg, erittyy lantaan. Lantaan erittyvä fosforiylijäämä on vastaavasti 1,4 kg. Lihaska painaa teurastettuna noin 82 kg.

Broilerin typen saanti on 191 g ja fosforin 37 g (Nousiainen, 2014, suullinen tiedonanto). Eläimeen pidättyy tyypeä 110 g ja fosforista 14 g. Typen ylijäämä on 80 g ja fosforiylijäämä 24 g.

Lannan käsittelystä ja varastoinnista sekä laidunnuksesta aiheutuneet typen häviöt määritetään Suomen oloihin muunnettujen ammoniakki-kerrointen avulla (Grönroos ym. 2009). Kullekin lantatyypille, ja varastointitavoille on omat haihduntakertoimensa. Ellei varastointitapa ole tiedossa, käytetään Maatalouslaskennan (2010) mukaisia varastointilukuja kullekin lantatyypille.

3.6. Elintarvikkeiden jalostus

Taulukko 7. Ravinteiden luokitus: Elintarvikkeiden jalostus

| Siirtyvät ravinteet | Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttö-ravinteet |
|--|---|---|--|--|
| Tuotteen tuottamista varten käyttöön otetut raaka-aineet | | Kierrätysraaka-aineet | Jäteveden ja kiinteiden hävikkivirtojen käsittelystä aiheutuneet ravinnepäästöt ilmaan ja veteen | Toivottu tuote |
| | Kuljetusten ja prosessin energian kulutus | Kuljetusten ja prosessin energiankulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Polttoainetta poltettaessa syntyvät päästöt (NO _x , N ₂ O ja NH ₃) | Toiseen tuotantoketjuun siirtyvät sivuvirrat |
| | | | Polttoon päätyvien sivuvirtojen tyyppi kokonaisuudessaan, fosfori siltä osin, kun polttotuhka ei päädy lannoituskäyttöön | |

3.6.1. Jalostusvaiheen kuvaus

Ravinnelaskentaa varten elintarvikkeiden tuotantoprosessi selvitetään niin tarkalla tasolla, kuin mahdollista. Laskentaa varten on tunnettava kaikki tuotantoon tarvittavat panokset, sekä niiden sisältämät ravinnepitoisuudet. Ravinnevirta-analyysiin otetaan vain päätuotteen valmistamista koskevat yksiköprosessit huomioon, mihin sisältyen selvitetään sivuvirtajakeiden jatkokäyttö sekä ravinnepitoisuudet. Prosessin tuntemisen lisäksi on selvittävää, onko laitoksella oma jäteveden käsittelyjärjestelmä, vai johdetaanko tuotetut jätevedet kunnalliseen jätevedenpuhdistamoon.

Koska prosessikohtainen ravinnelaskenta perustuu massavirtojen ja niiden ravinteiden tuntemiseen, mahdollisimman oikean ravinnepitoisuuden selvittäminen on oleellisessa roolissa. Ellei elintarviketoimijalta ole saatavissa ravinnepitoisuuksia, tuotteille tai sivuvirroille voidaan käyttää esim. Finelin ravintosisältötaulukkoa (www.fineli.fi). Finelin tietokanta sisältää tuotteiden kokonaisproteiinimäärän, josta tyypipitoisuus on johdettavissa (prot.määrä / 6,25 = N-määrä). Tietokannassa ei ole sen sijaan kerrottu lainkaan tuotteiden fosforipitoisuuksia. Tällöin täytyy turvautua muihin kansallisiin tai kansainvälisiin tietolähteisiin. Etenkin rehukäyttöön soveltuvien sivuvirtojen ravinnepitoisuuksia on koottu MTT:n rehutaulukoihin.

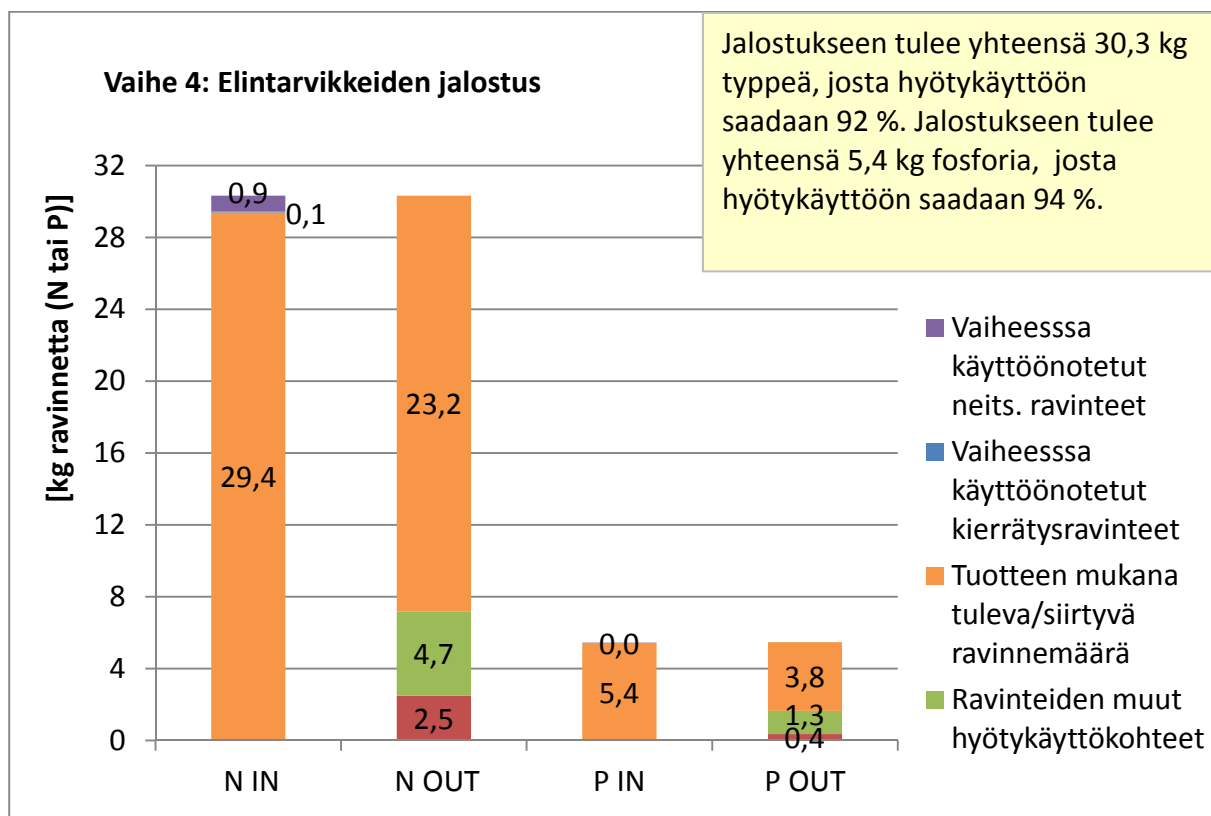
Rehutaulukon mukaan käytettiin tyyppi ja fosfori-pitoisuuksia kuorittulle kauralle, eli kaurahiutaleelle $N = \text{kg} / \text{kg}$ kuorittua kauraa, $P = \text{kg} / \text{kg}$ kuorittua kauraa, ja kuori-fraktiolle ("kaurankuorijauhe") $N = \text{kg} / \text{kg}$ kuorifraktiota; $P = \text{kg} / \text{kg}$ kuorifraktiota.

Prosesseissa tarvittavat ravinnepanokset jaotellaan uusiin ja kierrätettyihin taulukon 6 mukaisesti. Ketjun ravinnepanoksiksi lasketaan myös prosessin vaatimien sähkön ja lämmityksen (jäähdytyksen) tuotantoon tarvittavat ravinnepanokset. Sen sijaan tuotantorakennusten rakentamiseen, tai ylläpitoon liittyviä ravinnepanoksia ei ole otettu tässä laskentamenetelmässä huomioon.

Ravinteiden hyötykäytöksi lasketaan prosessoinnin päätuotteen sisältämien ravinteiden lisäksi niiden sivuvirtojen sisältämät ravinteet, joilla on osoitettu olevan välitöntä hyötykäyttöä. Pitkäaikainen, kuten vuosia kestävä varastointi voidaan katsoa olevan ravinteiden hukkaa (hävikkiä). Pääprosessista erkanevien sivuvirtojen jatkokäsittely on siis tunnettava. Jos esimerkiksi sivuvirtajae poltetaan energiaksi, kyseisestä ravinneosuudesta oletetaan hyötykäyttäväksi vain se osuus, mikä etenee polttoprosessin jälkeen lannoitushyötykäyttöön. Kaurahiutaleprosessissa kauran jyvät kuoritaan, ja saatu kuorimassa jatkaa hyötykäyttöön eläinten rehun valmistukseen tai energian tuotantoon. Lisäksi jyvien lajittelusta sekä hiutaloinnista syntyy hyötykäyttöön päätyviä kaurajakeita.

Prosessista syntyneet ravinnehäviöt lukeutuvat pääprosessista aiheutuviin kiinteisiin jätevirtoihin (lajittelu seka- ja biojätteisiin), mutta myös jäteveden puhdistuksen aiheuttamiin ravinnehäviöihin (kunnallinen / laitoksen oma puhdistamo) ja mahdollisiin muihin prosessissa tunnettuihin häviöihin, kuten pilaantumisesta tai pakkausvaiheessa syntyneisiin häviövirtoihin. Kiinteiden jätteiden sekä jäteveden käsittelyn hyöty- ja häviöravinnepäästöt lasketaan, kuten luvussa 3.9 on kuvattu.

3.6.2. Jalostusvaiheen tulokset



Kuva 5. Elintarvikkeiden jalostus

Jalostusvaiheeseen tuleva ravinne sisältyy miltei kokonaan tehtaalte tulevaan viljaan. Kauraa tulee tehtaalte noin 1580 kilogrammaa ja se sisältää typpeä 29,4 kg ja fosforia 5,4 kg (kuva 5). Näiden lisäksi otetaan käyttöön pieni määrä ravinnetta polttoaineen ja palamisilman muodossa, kun vilja kuljetetaan tiloilta tehtaille sekä sitä prosessoidaan tehtaalte.

Kaurahiutaleen valmistusprosessissa suurin osa ravinteista saadaan tuotteeseen, mutta myös sivuvirtoja ja hävikkiä syntyy. Osa kauran osista, jotka eivät sovellu kaurahiutaleiksi, menevät rehutuo- tantoon. Tällöin eläinten rehuksi päätyvä osuus katsotaankin ravinnejalanjäljessä hyötykäytöksi. Toi- saalta hävikki, joka ei päädy hyötykäyttöön vaan joka esimerkiksi poltetaan, katsotaan ravinnejalan- jäljessä ravinnepäästöksi.

3.7. Jakelu, varastointi ja kauppa

Taulukko 8. Ravinteiden luokitus: varastointi ja kauppa

| Siirtyvät ravinteet | Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttöravinteet |
|---|--|---|--|--|
| Varastoitava ja kuljetettava tuotemäärä | Elintarvikkeen säilyttämiseen liittyvä sähkönkulutus | Elintarvikkeen säilyttämiseen liittyvä sähkönkulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Jakeluketjussa, varastoinnissa ja kaupassa syntyvä elintarvikehävikki, ja niiden käsittelystä aiheutuneet ravinnepestöt luontoon | Varastoitettu ja kuljetettu tuotemäärä |
| | Kuljetusten energiankulutus | Kuljetusten energiankulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Polttoainetta poltettaessa syntyvät pakokaasupäästöt (NO_x , N_2O ja NH_3) | |

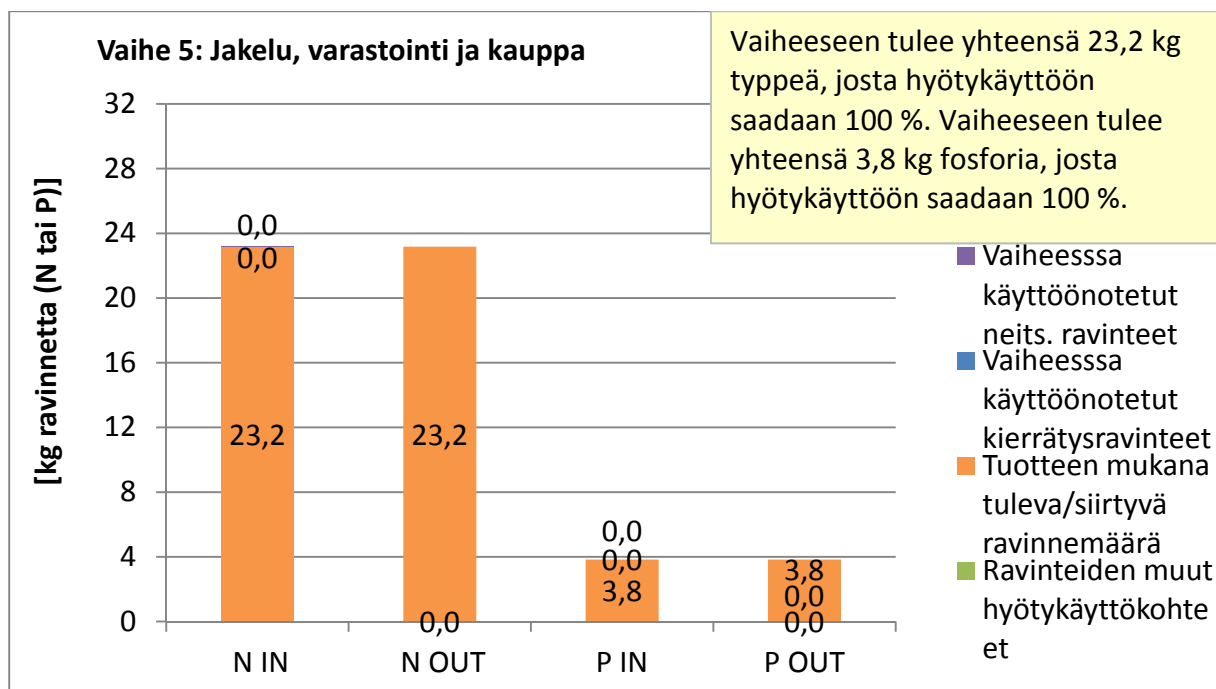
3.7.1. Jakelu-, varastointi- ja kauppavaiheen kuvaus

Mikäli elintarvike vaatii säilyäkseen pakastusta tai muuta kylmäsäilytystä, otetaan energiankulutus huomioon ravinnejalanjälkitarkastelussa. Kiinteistölle kuuluvaa energiankulutusta, kuten valaistusta, lämmitystä ja jäähdytystä ei huomioida tarkastelussa.

Kaurahiutaleet eivät vaadi kylmäsäilytystä, joten laskentaesimerkissä varastoinnissa ja kaupassa ei aiheudu energiankulutusta.

Laskennassa huomioidaan jakeluketjussa, varastoinnissa ja kaupassa syntyvä elintarvikehävikki, ja tarkastellaan sen käsittelyä jätteenä. Kaurahiutale on kuivat tuotteena pitkään säilyvä, ja tutkimus on osoittanut, että vähiten hävikkiä ruokakaupoissa syntyy juuri säilykkeistä, kuivatuista, pakastetuista ja muista pitkän käyttöajan tuotteista (Silvennoinen 2012). Näin ollen oletetaan, että elintarvikehävikkiä ei synny tässä elinkaaren vaiheessa.

3.7.2. Jakelu-, varastointi- ja kauppavaiheen tulokset



Kuva 6. Jakelu, varastointi ja kauppa

Jakelu-, varastointi- ja kauppavaiheissa on huomioitu vain kaurahiutaleiden mukana siirtyvät ravinnemäärät, sekä tyyppi, joka sisältyy kuljetusten polttoaineeseen (kuva 6). Kuljetuksista on huomioitu tuotteen kuljettaminen tehtaalta keskusvarastolle. Kuten edellä todettiin, oletetaan, että tässä vaiheessa ei synny tuotehävikkiä, eikä tuote vaadi säilyäkseen erityistä energiankulutusta, joten hyötykäyttöasteet ravinteille ovat 100 %. On kuitenkin huomioitava, että tuotteesta riippuen energiankulutus ja hävikkiosuudet voivat vaihdella paljonkin.

3.8. Kulutus

Taulukko 9. Ravinteiden luokitus: kulutus

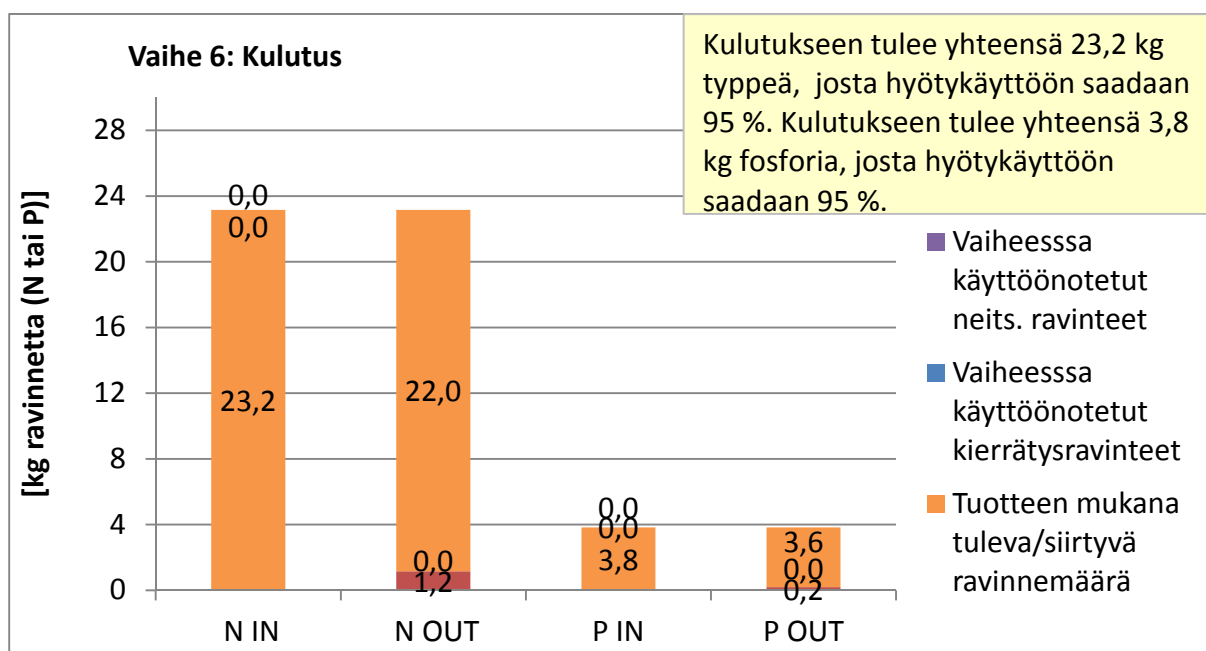
| Siirtyvät ravinteet | Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttöravinteet |
|---------------------|--|---|---|--|
| Tuotettu tuote | Elintarvikkeen valmistamiseen liittyvä sähkönkulutus | Elintarvikkeen valmistamiseen liittyvä sähkönkulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Jäteveden ja kiinteiden hävikkivirtojen käsittelystä aiheutuneet ravinnepäästöt ilmaan ja veteen | Imeytynyt ravinne = ravitsemuksellinen hyöty |
| | Kuljetusten energian kulutus | Kuljetusten energiankulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Polttoainetta poltettaessa syntyvät ilman päästöt (NO_x , N_2O ja NH_3) | |

3.8.1. Kulutusvaiheen kuvaus

Tarkastelussa ei oteta huomioon ruuan valmistukseen ja säilyttämiseen tarvittavaa energiaa. Ruuan valmistamisen ja säilyttämisen kuluttamalta energiamäärältä ei voida välttyä ja sen useimmiten pitää sisällään paljon epävarmuuksia. Ruokaa säilytetään eripituisia aikoja, ja sitä valmistetaan erilaisin menetelmin (kaurapuuron tapauksessa esimerkiksi liedellä tai mikroaaltouunissa). Mikäli ravinnejalanjäljellä vertaillaan tuotteita, joiden energiankulutuksen tiedetään eroavan merkittävästi kulutusvaiheessa, voidaan tarkasteluun sisällyttää kulutuksen aikainen energian kulutus.

Tarkastelussa otetaan huomioon, millainen määrä elintarvikkeesta päätyy hävikkiin, eli muualle kuin ravinnoksi. Kodissa/ravintolassa on tarkasteltava, kuinka paljon syntyy valmistushävikkiä, tarjoi-
luhävikkiä sekä lautashävikkiä. Valmistushävikkiä ei kaurapuuron osalta oleteta syntyvän. Kaurapuuron osalta kulutuksessa muodostuva hävikkimäärä on asiantuntija-arvion mukaan valmistetun puuron määrästä noin 5 % (Hartikainen 2013). Tarkastelussa on hyvä kiinnittää huomiota siihen, missä elintarvike kulutetaan ja miten ruokahävikin määrään vaikuttaa se, että ruoka tarjoillaan kotona, ravintolassa tai työpaikan/koulun ruokalassa. Paremman tiedon puuttuessa on kaurahiutalecasessa oletettu, valmistuspaikasta riippumatta, 5 % kaurapuurosta joutuu hävikkiin ja tämä osuus käsitellään jätteenä.

3.8.2. Kulutusvaiheen tulokset



Kuva 7. Kulutus

Kulutuksessa on huomioitu ainoastaan ruuan mukana sisään tulevat ravinnemäärät ja ravinnepäästöinä ruokahävikkinä syömättä jäänyt osa kaurahiutaleista/kaurapuurosta (kuva 7). Tuotteen mukana siis siirtyy ruuansulatusjärjestelmän läpikäyneenä suurin osa ravinteista jätevedenkäsittelyyn. Jätevedenkäsittelyyn päätyvää osaa ei siis pidetä tässä kohden ravinnehäviönä, koska se kuuluu luonnollisena ja välttämättömänä osana ravintojärjestelmään, toisin kuin elintarvikehävikin jätehuolto.

3.9. Jätehuolto

Taulukko 10. Ravinteiden luokitus: Jätehuolto

| Siirtyvät ravinteet | Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttö-ravinteet |
|---|---|--|--|--|
| Jätehuoltoon päätyvä osuus elintarvikkeesta -ravinteet elintarvikkehävikissä, joka käsitellään kiinteän jätteen jätehuoltojärjestelmissä -jäteveden-käsittelyyn päätyvän ulosteen ja virtsan sisältävät ravinteet | Kompostointiprosessin sähkönkulutus Kompostoinnin tukiaineen sisältämä typpi | Kompostointiprosessin sähkönkulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Kompostoinnissa syntyvät typpipäästöt (N ₂ O, NH ₃ , N ₂) Kompostoinnin lopputuotteesta se osuus, jolla ei ole ravinnehyötykäyttöä | Kompostoinnin lopputuotteesta se osuus, joka menee ravinnehyötykäyttöön maatalouteen tai viherrakentamiseen |
| | Mädätysprosessin sähkön ja lämmön kulutus | Mädätysprosessin sähkönkulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Mädätyksen lopputuotteesta se osuus, jolla ei ole ravinnehyötykäyttöä | Mädätyksen lopputuotteesta se osuus, joka menee ravinnehyötykäyttöön maatalouteen tai viherrakentamiseen |
| | | | Energiahyötykäyttöön ja kaatopaikalle menevät jätevirrat | |
| | Jätevedenkäsittelyn sähkönkulutus | Jätevedenkäsittelyprosessin sähkönkulutus (kierrätyspolttoaineilla tuotettu osuus) | Jätevedenkäsittelylaitoksen purkuvesien sisältämä typpi ja fosfori Jätevedenkäsittelyn typpipäästöt ilmaan (N ₂ O, N ₂) Lietteestä se osuus, jolla ei ole ravinnehyötykäyttöä | Lietteestä osuus, joka menee käsittelyn jälkeen hyötykäyttöön lannoitteena maatalouteen tai viherrakentamiseen |

3.10. Jätehuoltovaiheen kuvaus

Jätehuollon ja kierrätyksen tarkasteluun liittyy olennaisesti päätös siitä, milloin ravinnepitoinen jäte- tai sivuvirta menee hyötykäyttöön (taulukko 10).

Ravinteiden kierrätyksen tarkastelu ulotetaan niin pitkälle, että saadaan selville, jääkö ravinne välittömästi hyötykäyttöön, tai onko ravinnetta mahdollonta saada hyötykäyttöön lähitulevaisuudessa. Selkeänä hyötykäyttönä ajatellaan sivuvirran käyttöä, jolla voidaan syrjäyttää uusien ravinnepanosten käyttöönottoa. Maanviljelyskäyttöön päätyvän kierrätysprosessin lopputuotteen voidaan

katsoa edustavan suljettua kiertoa, eli elintarvikeketjusta peräisin oleva ravinne palautuu takaisin alkutuotantoon, uusien elintarvikkeiden panokseksi.

Materiaalia voidaan käyttää hyväksi lannoitteena eli ns. maanparannusaineena myös muissa kohteissa, kuin maanviljelyksessä, esimerkiksi puutarhoissa, puistoissa ja metsissä. Tällöin puhutaan yleensä viherrakentamisesta, mutta haasteellista tarkastelusta tekee myös se, mitä tarkoitetaan viherrakentamisella. Myllymaan et al. mukaan (2008) viherrakentamisella tarkoitetaan yleensä nurmikoiden, pensasalueiden ja puistojen perustamista. Viherrakentamisen alle voidaan joskus myös lukea maisemointi, jossa maa-ainesta käytetään peittämään suljettavia kaatopaikkoja tai saastuneita maa-alueita.

Ravinnejalanjälkitarkastelussa oletetaan, että viherrakentamisessa käytetään hyväksi materiaalin sisältämää ravinnetta lannoitteena sekä materiaalia kasvualustana. Näin tehdään ero muihin hyötykäyttökohteisiin, joissa materiaalia käytetään esimerkiksi täyteaineena ja tai maanpeitteenä. Tällöinkin maa-aineksen tehtävä voi olla hyvin tärkeä esimerkiksi eroosion estäjänä tai rakennusmateriaalina, mutta voidaan olettaa, että tällainen käyttö ei edistä ravinteiden kiertämistä saati vähennä neitseellisen ravinteiden käyttöönottoa. Näin ollen jätevesilietteestä ja biojätteestä saadun lannoitevalmisteen/multatuotteen muut käyttökohteet kuin maanviljely ja viherrakentaminen katsotaan hukatuksi ravinteeksi ravinnejalanjälkeä laskettaessa. Näiden lisäksi hukattua ravinnetta katsotaan olevan prosesseissa ilmakehään haihtuneet typen yhdisteet, sekä huuhtoutumien ja purkuvesien kautta vesistöihin päätyvät typpi ja fosfori. Ravinne katsotaan myös hukatuksi, jos se päätyy kaatopaikalle tai energiahyötykäyttöön, eikä energiahyötykäytön tuhkaa voida käyttää hyväksi lannoitteena.

Jätehuollon tarkasteluun sisältyy paljon epävarmuuksia ja haasteita. Esimerkiksi määrittäessä elintarvikeketjun ravinnejalanjälkeä, jossa tutkitaan tietyn ruokatuotteen elinkaarta ja tuote on kauppojen levityksen kautta käytössä koko maassa, on mahdotonta sanoa, mikä on jätteen syntypiste. Tällöin ei voida myöskään määrittellä, millainen jätehuoltojärjestelmä on kyseessä.

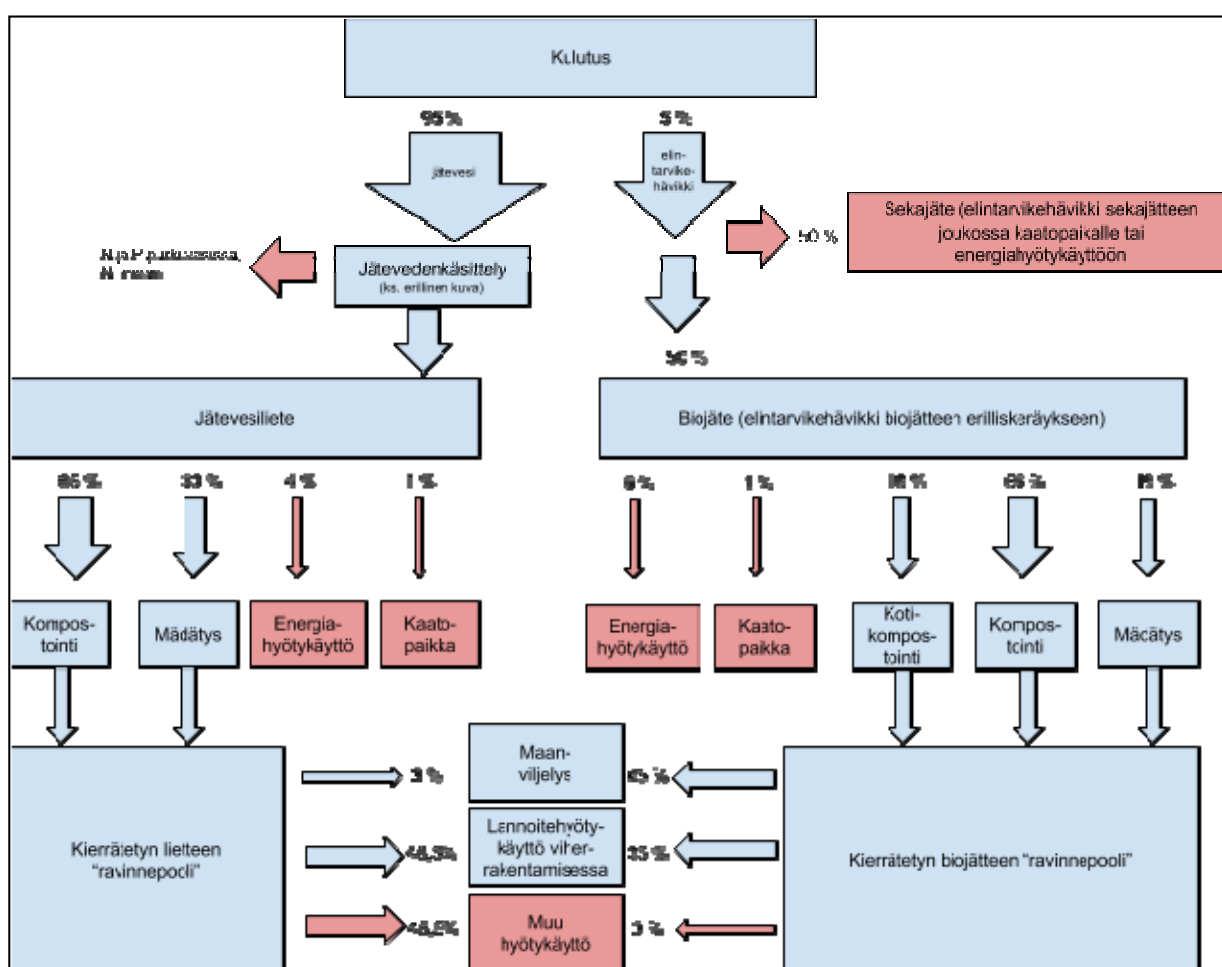
Yksittäisten jätteenkäsittelylaitosten arvojen käyttö ei tällaisessa tilanteessa ole suositeltavaa, koska laitokset ympäri Suomen toimivat eri tavoin ja tuottavat eri määrän päästöjä. Näin ollen on pyritty etsimään keskiarvotietoja Suomen oloista, mutta taas on huomioitava, ne ovat vain keskimääräisiä, ja tiettyjen prosessien hyvyys tai huonous ei välttämättä tule niistä esiin. Kuitenkin voitaneen olettaa, että ne edustavat tyypillisiä suomalaisia prosesseja. Mädätyksen ja kompostoinnin osalta on tiedot ovat peräisin Suomen Ympäristökeskuksen Polku-hankkeesta (Myllymaa 2008), jossa on pyritty esittämään syöte- ja tuotostietoja tyypillisistä suomalaisista prosesseista. Lähde on paljon käytetty elinkaariarvioinnissa, mutta on myös muistettava, että tiedot saattavat olla vanhentuneita ja edustaa rajallista otosta tarkasteluhetkellä käytössä olleesta tekniikasta. Mikäli tarkastelua tehdessä tiedetään, mitkä jätteenkäsittelyvaihtoehdot ja -laitokset ovat käytössä tarkasteltavalle kohteelle, onkin suositeltavampaa käyttää primääritietoa näistä laitoksista. Myös jätevedenkäsittelyssä on paljon paikallisia eroja ja puhdistustehokkuus määritetään laitosten ympäristöluvuissa. Tässä tarkastelussa onkin päädytty käyttämään suomalaista keskimääräistä puhdistustehokkuutta vuodelta 2010 (Säylä & Vilpas 2012). Mikäli tarkastelua tehdessä tiedetään, mitkä jätteenkäsittelyvaihtoehdot ja -laitokset ovat käytössä tarkasteltavalle kohteelle, onkin suositeltavampaa käyttää primääritietoa näistä laitoksista.

Elintarvikeketjussa syntyvää jätemäärää määrittäessä tulee selvittää, kuinka paljon ruokahävikkiä syntyy. Kotitalouksissa kaurapuurosta hävikkiin joutuu noin 5 % valmistetusta puurosta (Hartikainen 2013), kuten aiemmin todettiin. On myös määriteltävä, kuinka paljon tästä hävikkimäärästä lajitellaan oikein biojätteen joukkoon ja kuinka paljon ruuasta päätyy sekajätteen joukkoon.

Jotta tätä suhdetta pystytään määrittämään, on tutustuttava sekajätteen koostumuksesta tehtyihin tutkimuksiin. Koostumustutkimuksissa on myös eroja, sillä toisissa selvitetään, mikä on biojätteen osuus sekajätteessä, ja toisissa tarkemmin, mikä on keittiöjätteen osuus. Kummassakin tapauksessa on mukana siis myös ruuaksi kelpaamatonta ainesta, minkä vuoksi sekajätteen joukkoon joutuva osuus elintarvikkeesta näyttyy liian suurena. Tarkastelussa oletetaan, että 50 % syntyvästä ruokahävikistä päätyy sekajätteen joukkoon ja 50 % erilliskerätyn biojätteen joukkoon. Oletus perustuu

sekajätteen koostumuksesta tehtyihin tutkimuksiin pääkaupunkiseudulla (HSY 2013a) ja Etelä-Karjalassa (Teirasvuo 2011). Biolaitosyhdistyksen asiantuntija-arvion mukaan oletus saattaa olla myös liian positiivinen erilliskerätyn biojätteen saannon suhteen (Gareis ja Pirkkamaa 2014).

Erilliskerätyn biojätteen käsittelymenetelmistä on käytetty tilastotietoja (Suomen virallinen tilasto 2011, Espo 2013). Kuvassa 8 on esitetty erilliskerättyjen biohajoavien keittiö- ja ruokalajätteiden kulkeutuminen Suomessa eri käsittelyvaihtoehtoihin. Suurin osa tästä materiaalista päätyy kierrätykseen (n. 92 %), ja edelleen suurimmalta osalta kompostointiin. Laitosmaisesti kompostoitii n. 56 % erilliskerätystä biohajoavasta keittiö- ja ruokalajätteestä, kotikompostoriin päätyi n. 18 % ja n. 19 % määrä mädätykseen. Energiahyötykäyttöön päätyy n. 6 % erilliskerätystä biojätteestä ja kaatopaikalle n. 1 %. (Suomen virallinen tilasto 2011, Espo 2013). Kuvassa 8 esitettyihin arvoihin jätevedestä ja ravinteiden hyötykäyttökohteista palataan tekstissä jäljempänä.



Kuva 8. Jätevesilietteen ja erilliskerätyn biojätteen kulku hyötykäyttökohteisiin tai hukatuiksi ravinteiksi

Kompostointi

Kompostointia voidaan hyödyntää sekä biojätteen (tässä tapauksessa ruokahävikin) ja jätevesilietteen käsittelyssä (kuva 8).e

Kompostoinnissa mikrobit hajottavat hapellisissa ja kosteissa olosuhteissa eloperäisestä jätteestä humusta, josta voidaan valmistaa multatuotteita tai sitä voidaan käyttää esimerkiksi suljettujen kaatopaikkojen maisemointiin. Reaktiotuotteena syntyy myös lämpöä, hiilidioksidia ja vettä. Jos komposti on liian märkä, ravinteita voi huuhtoutua pois. Liian suuri vesimäärä voi myös täyttää huo-

koset ja näin estää hapen otton. (Tchobanoglous et al. 1993). Kompostilaitoksilla ylijääviä jätevesiä ja valumavesiä kerätään ja ohjataan jäteveden käsittelyyn. Jätevettä, joka johdetaan jäteveden käsittelyyn, syntyy kompostointiprosessissa 0-0,3 m³/t biojätettä (Kaila et al. 2006). Laskennassa tehdään oletus, että kompostointiprosessista ei synny jätevedenkäsittelyyn päätyvää jätevettä.

Kompostin hiili-typpeä -suhteen (C:N-suhde) on oltava pieneliöille sopiva. Hiiltä on aina oltava enemmän, suhteessa typpeen noin 25:1. Jos typpeä on ylimäärin, ammoniakkin muodossa oleva typpeä jää käyttämättä ja haihtuu ilmaan. Liian pieni typpimäärä taas hidastaa kompostointiprosessia. Hyvässä kompostissa tulisi siis olla sopivassa suhteessa typpipitoisia ja hiilipitoisia eloperäisiä aineita. (Tchobanoglous et al. 1993).

Polku-hankkeessa kerättyjen inventaariotietojen mukaan (Myllymaa 2008) kompostointiprosessissa syntyy ilmapäästöinä metaanin ja hiilidioksidin lisäksi typpipäästöinä noin 25–50 % biohajoavan aineksen sisältämästä typestä. Tästä 1,2–5 % on dityppioksidia, 95–98 % ammoniumtyppeä ja loput n. 0,8 % typpikaasua.

Ilman kierron parantamiseksi kompostiin lisätään yleensä tukiainetta. Kompostointilaitoksissa käytetään tukiaineena yleisimmin haketta (71 %). Turpeen osuus on noin 25 %, kutterilastun, oljen ja sahajauhon osuus yhteensä noin 4 % (Lehto & Ekholm 2001). Hakkeen typpipitoisuus on n. 0,3–0,5 p-% hakkeen kuiva-aineosuudesta (Alakangas 2000). Laskennassa tehdään oletus, että tukiaineena käytetään pelkästään haketta. Hakkeen kuiva-aineisuus taas vaihtelee riippuen puulajista ja siitä, mitä osaa puusta on käytetty, mutta nyt oletetaan perustuen Alakankaan keräämiin tilastoihin (2000), että hakkeen kuiva-ainepitoisuus on 50 %. Biojätettä kompostoitaessa tukiainetta tarvitaan noin 1:1, lietettä kompostoitaessa tukiaineen tarve voi olla suurempi riippuen kompostointilaitoksen tyypistä.

Kompostilaitosten hajukaasupesureissa käytetään ammoniakkin sitomiseen rikki- tai typpihappoa. Jätevesilietettä kompostoitaessa hapen määrä on noin 12 kg jätetonnin kohden ja biojätettä kompostoitaessa huomattavasti pienempi (Lehto & Ekholm 2001). Hapon ravinnepitoisuus on kuitenkin niin pieni, että se voidaan jättää huomioimatta.

Kompostointiprosessissa on huomioitava myös energiankulutus. Myllymaa et al. (2008) tietojen mukaan prosessisähkön kulutus on 79,2 MJ sekä kompostoitavaa biojäte- että lietetonnin kohden.

Kompostin lopputuotteen käyttöä tarkastellaan edempänä kappaleessa ”Jätevesilietteen, mädätyksen ja kompostoinnin lopputuotteiden käyttökohteet”

Mädätys

Mädätystä voidaan hyödyntää sekä biojätteen (tässä tapauksessa ruokahävikin) ja jätevesilietteen käsittelyssä.

Mädätyksessä esikäsitelty massa hajoaa mikro-organismien toiminnan tuloksena hapettomissa olosuhteissa. Reaktiossa syntyy biokaasua, joka kerätään talteen ja voidaan käyttää hyödyksi energiantuotannossa, sekä mädätettä, joka voidaan kuivauksen jälkeen polttaa tai käyttää maanparannusaineena. Ennen maanparannusaineena käyttöä mädänte kuitenkin yleensä kompostoidaan sen stabiloimiseksi. (Kaila et al. 2006.)

Mädätyksen tapahtuessa suljetussa reaktorissa ravinteiden säilyminen on siten parempaa kuin kompostoinnissa (Hakala & Välimäki 2003). Mädätysprosessi on itsessään päästötön lukuun ottamatta satunnaisia metaanivuotoja (Myllymaa et al. 2008). Jätteenä ollut typpeä on biokaasuprosessissa muuntunut suurelta osin liukoiseksi ammoniumtyypeksi, eli kasveille helppokäyttöiseen muotoon (Lehtomäki et al. 2007). Mädätysjäätännöksen käsittelyssä, mekaanisessa kuivauksessa, kuitenkin osa ravinteista siirtyy rejektiveden mukana joko takaisin kiertoon tai ylimääräisenä vetenä jätevedenpuhdistukseen. Fosforista suuri osa pysyy kiintoaineksen mukana, mutta suuri osa typestä päätyy nesteosaan. Fosforin huono liukoisuus johtuu paljolti siitä, että se on jätevedenkäsittelyssä saostettu rauta- tai alumiinisulfaattiin. (Peltonen & Harmoinen 2009.) Myllymaan (2008) arvoja mukaillen mädätysprosessissa oletetaan kokonaistyypistä 12 % jäävän mädäntejäätännökseen ja 88 % rejektiveteen. Vastaavasti fosforista oletetaan menevän mädänteeseen 67 % ja rejektiveteen 33 %.

Mädätysjäännöksen mekaanisessa kuivauksessa rejektivettä syntyy noin 75–90 % ja mahdollisessa termisessä kuivauksessa noin 70 % kuivausyksikössä kuivattavan lietteen määrästä. Rejektiveden käsittelyssä oleellista on toimiva kiintoaineen poisto fosforin ja orgaanisen aineksen ollessa siihen sitoutuneena. Liukoinen typpi poistetaan tyyppillisesti biologisessa aerobisessa jätevedenpuhdistusprosessissa. Myös fysikaalisia menetelmiä, kuten strippausta (jossa veden pH:ta nostamalla muunnetaan ammoniumtyppi kaasumaiseksi ammoniakiksi, joka erotetaan kaasun strippauksella) ja kalvotekniikoita voidaan käyttää. (Latvala 2009.) Jätevedenkäsittelystä kerrotaan tarkemmin tässä luvussa jäljempänä.

Mädätyksessä on huomioitava prosessin energian kulutus. Tyyppillinen termofiilinen mädätyslaitos kuluttaa sähköä 59 MJ ja lämpöä 239 MJ jätetonnin kohden (Myllymaa et al. 2008).

Mädätysjäännöksen käyttöä tarkastellaan edempänä kappaleessa ”Jätevesilietteen, mädätyksen ja kompostoinnin lopputuotteiden käyttökohteet”.

Energiahyötykäyttö

Jätteen polttokäsittelyn tarkoituksena on jätteen energiasisällön hyödyntäminen, kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrän vähentäminen ja kaatopaikalle sijoitettavan jätteen sisältämän biohajoavan materiaalin poistaminen (Kaila et al. 2006). Poltettaessa jätettä sen sisältämä typpi vapautuu NO_x-päästöinä. Osa fosforista jää tuhkaan, mutta sen hyötykäyttöä rajoittaa tuhkan sisältämät raskasmetallit. Fosforin erotus tuhkasta nähdään kuitenkin yhtenä tulevaisuuden vaihtoehtona fosforiresurssien rajallisuuden takia (Havukainen et al. 2012). Kuitenkin, koska lannoituskäyttö on mahdollista vain pelkästään puuta, turvetta tai energiakasveja polttavan laitoksen tuhkasta (Evira 2008), oletetaan, että jätteen ja jätevesilietteen polttamisella hukataan ravinteet kokonaisuudessaan.

Kaatopaikka

Kaatopaikkakäsittelyn tarkoituksena on jätteiden loppusijoitus, kun ne eivät sovellu muuhun käsittelyyn (Kaila et al. 2006). Kaatopaikalla tapahtuu haihtumia ilmaan (NH₃, N₂O ja N₂), huuhtoutumia suotovesien mukana sekä osa ravinteista varastoituu kaatopaikalle (Jokela & Rintala 2003). Kaatopaikkojen suotovesille on tyyppillisestä korkea tyyppiyhdisteiden pitoisuus ja matala fosforipitoisuus (Kaila et al. 2006). Kaatopaikalle päätyvät aines ja sen sisältämät ravinteet katsotaan hukatuksi. Tar kastelussa oletetaan, ettei kaatopaikalta saada ravinteita talteen ja katsotaan, että orgaanisen aineksen kaatopaikkakiellon myötä, ei kaatopaikkasijoittamista tulisi suosiakaan ravinnejalanjäljessä, vaikka teoriassa pieni osa ravinteista voitaisiinkin saada suotovesien käsittelyn avulla talteen.

Jätevedenkäsittely

Ihmisen syötyä ruuan, ravinteet päätyvät ulosteisiin ja virtsaan ja edelleen jätevedenkäsittelyyn. Keskimääräisesti aikuisilla terveillä ihmisillä fosforin ja typen ei oleteta kerääntyvän elimistöön, vaan sama määrä tyyppiä tai fosforia ulostetaan, mitä on syöty. Vanhuksilla ja lapsilla elimistön ravinnetase poikkeaa hieman aikuisten elimistön toiminnasta.

Suomen asukkaista yli 80 % kuuluu keskitetyn viemäröinnin tai jäteveden käsittelyn piiriin (Vesilaitosyhdistys 2013a). Tästä johtuen ravinteiden kiertoa tarkastellaan nyt jätevedenpuhdistuslaitosten kautta eikä haja-asutusalueiden pienpuhdistamoita ja muita ratkaisuja käsitellä muutoin. Maatilalla asumisesta ja tilan toiminnoista sako- tai umpikaivolietettä sekä kuivakäymäläjätettä voidaan levittää pellolle, mutta niin, että liete on käsitelty eikä se aiheuta terveys-, ympäristö- ja hajuhaittoja. Hyväksytyt käsittelymenetelmät ovat kalkkistabilointi, kompostointi, termofiilinen mädätys sekä mesofiilinen mädätys. (Vesilaitosyhdistys, 2013b.)

Suomessa yleisin puhdistusmenetelmä jätevedenkäsittelylaitoksilla on biologis-kemiallinen rinnakkaissaostus. Fosforia poistetaan lisäämällä jäteveteen yleensä rauta- tai alumiinipohjaista kemiaalia, joka saostaa fosforin ja se laskeutuu altaan pohjalle, jolloin se voidaan erottaa lietteen mukana. (Säylä & Vilpas 2012.) Fosforin määrä ei käsittelyssä juuri muutu. Fosforia voidaan poistaa myös biologisesti anaerobisissa oloissa menestyvien, fosforia ravinnokeeseen käyttävien sienten avulla, mut-

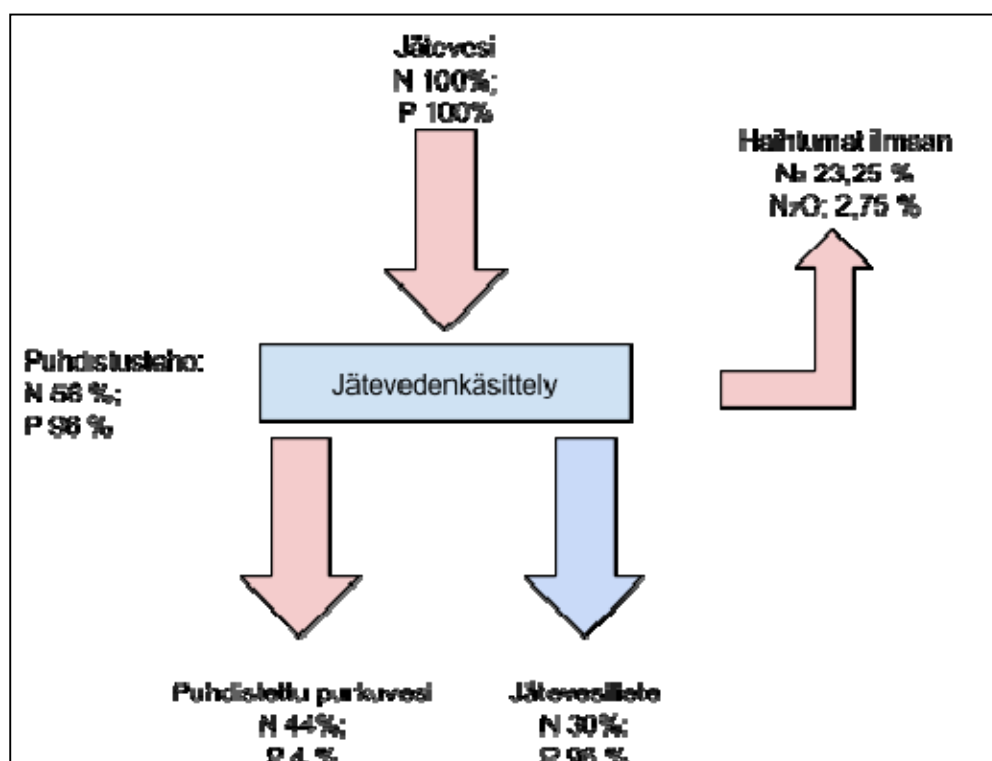
ta tämä on Suomessa harvinaista, koska kemiallisella fosforinpoistolla päästään parempiin tuloksiin (Vesilaitosyhdistys 2013b).

Typpeä taas poistetaan yleisimmin biologisesti mikrobien avulla. Typpi esiintyy jätevedessä ammoniumtyyppinä ja sitä poistetaan kahdessa peräkkäisessä biologisessa prosessissa: nitrifikaatiossa ja denitrifikaatiossa. Nitrifikaatiossa ammoniumtyppi hapetetaan nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi, kun mikrobit käyttävät ammoniumtyyppiä energian lähteenään ja hiilidioksidia hiilen lähteenä. Ammoniumtyypin hapettaminen nitraatiksi nitrifikaation avulla on vähimmäisvaatimus, mutta usein prosessia jatketaan kokonaistypen poistolla eli denitrifikaatiolla. Tämä on tarpeen silloin, kun puhdistettu jätevesi johdetaan mereen tai herkille vesialueille. Käytännössä sekä typen ja fosforin vaadittu puhdistustehokkuus määrätään laitospöytäsuojassa ympäristöluvassa. (Säylä & Vilpas 2012.)

Typenpoiston keskimääräinen teho on parantunut, mutta edelleenkin purkuvesistöihin pääsevän typpikuorman pienentäminen on haasteena jätevedenpuhdistamoilla. Jätevedenpuhdistamon tyypillinen puhdistusteho tyypelle on n. 56%. Fosforilla päästään n. 96% puhdistustehokkuuteen ja orgaaniselle ainekselle n. 97%. (Säylä & Vilpas 2012.) Poistetusta fosforista kaikki sitoutuu lietteen orgaaniseen ainesosaan, poistetusta typestä n. 30 % jää lietteeseen lopun vapautuessa ilmaan typpikaasuna (Vesilaitosyhdistys 2013b).

Jäteveden puhdistuksessa syntyy myös typpioksiduulipäästöjä, mutta päästöjen suuruus ja lähteet ovat melko tuntemattomia ja riippuvaisia jätevedenkäsittelylaitoksen toiminnoista ja olosuhteista (Kampscheur et al. 2009). Suomessa on tehty N_2O -mittauksia Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla noin vuoden ajalta ja tämän perusteella voidaan sanoa, että tulokuorman typestä n. 2,75 % jää N_2O -muotoon (Heinonen 2013b).

Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty jäteveden mukana tulevan typen ja fosforin siirtyminen lietteeseen (fosforille 96 % ja tyypelle 30 %), josta se on mahdollista saada osaltaan talteen, ja ravinteiden hävikkiosuudet sekä puhdistetun jäteveden mukana, N_2O -päästönä että N_2 -muodossa.



Kuva 9. Ravinnevirrat jätevedenkäsittelyprosessissa

Jäteveden puhdistusprosessin tuloksena syntyy siis puhdistetun veden lisäksi lietettä, joka on jäteveden mukana tullutta kiintoainesta sekä puhdistamolla muodostunutta biolietettä ja kemiallista lietettä. Jäteveden käsittelystä syntyvä lietteen määrä riippuu jäteveden kiintoainemäärästä ja aktiiviliete-

prosessin bakteerimassasta. Karkean arvion syntyvän lietteen määrästä saa, kun vertaa jätevedenkäsittelyprosessista syntyvää vuosittaista lietemäärää laitoksella käsiteltyyn jätevesimäärään. Esimerkiksi HSY:n Suomenojan ja Viikinmäen laitosten vuosittaisten tietojen mukaan lietettä syntyy noin 0,65 kg käsiteltävää jätevesikuutiota kohden.

Ravinteiden haltuunottoa tarkastellessa on jätevedenkäsittelyn osalta tarkasteltava myös prosessiin tulevat muut syötteen ja niiden sisältämät ravinteet. Yleisimmät fosforinpoistokemikaalit (ferrosulfaatti (FeSO_4), ferrisulfaatti ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) tai ferrikloridi (FeCl_3) tai alumiinisulfaatti ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ja polyalumiinikloridit (PAC)), harvakseltaan kalkki) eivät sisällä fosforia tai typpeä. Mikäli jätevesi ei sisällä mikrobeille tarpeeksi fosforia tai typpeä, fosforihappoa tai ureaa saatetaan lisätä ravinnelisinä.

Tarkastelussa on myös huomioitava prosessin energian kulutus. Mikäli tiedossa, suositellaan käytettävän kyseessä olevan laitoksen energiankulutustietoja. Ellei jätevedenkäsittelylaitosta voida määrittellä, energiankulutusta käsiteltäviä jätevettä kohden voidaan arvioida esimerkiksi lähteen (Pöyry Environment 2009) luvussa 8 esitettyjen lukemien perusteella. Tässä työssä on keskimääräistä jätevedenkäsittelyn energian kulutusta arvioitua tutkimuksen (Tukiainen 2009) perusteella, jossa on kerätty kyselyn avulla energiankulutustietoja suomalaisilta jätevedenpuhdistamoilta. Energiankulutuksessa on huomioitu sekä puhdistuslaitoksen oma kulutus sekä viemäriverkoston energiankulutus.

Jätevesilietteen käsittely

Jätevesilietettä käsitellään Suomessa monin eri tavoin. Lietettä voidaan kompostoida, mädättää ja kuivata termisesti, jonka jälkeen materiaali voidaan käyttää lannoitevalmisteena. Näitä menetelmiä voidaan käyttää yksinään, mutta on myös mahdollista, että liete käsitellään näiden menetelmien yhdistelmällä. Myös lietteen energiahyötykäyttö, eli polttaminen, on mahdollista, tällöin on tavallista, että lietettä on kuivattu termisen tai mekaanisen kuivauksen avulla tai sen poltto-ominaisuuksia on parannettu kompostoinnin tai mädätyksen avulla. Joillakin laitoksilla on myös käytössä kemiallisia menetelmiä lietteen käsittelyyn (Kemicond-menetelmä) (Lindsberg & Vilpas 2009.) Näin ollen on haasteellista arvioida tarkasti yhdyskuntien jätevesilietteiden reittejä eri käsittelyiden kautta eri käyttökohteisiin.

Länsi- ja Etelä-Suomen alueella syntyvien jätevesilietteiden käsittelyä on tilastoitu Länsi-Suomen ympäristökeskuksen taustaraportissa (Lindsberg & Vilpas 2009). Tarkastelualueella sijaitsee n. 350 jätevedenpuhdistamo (Lindsberg & Vilpas 2009) kaikista Suomen n. 540 puhdistamosta (Vesilaitosyhdistys, 2013a). Tarkastelussa käytetään tämän tilastoinnin arvoja lietteen käsittelystä ja käyttökohteista, koska raportti kattaa suuren osan Suomessa sijaitsevista puhdistamoista, eikä koko Suomea käsittävää tilastoa ei ole tiettävästi saatavilla.

Länsi- ja Etelä-Suomen alueella jätevesilietteestä 3 % poltetaan tai käsitellään teollisuuslaitoksella (Lindsberg & Vilpas 2009). Raportissa todetaan, että suuri osa lietteestä kompostoidaan, ja 27 % lietteestä mädätetään. Näiden tietojen perusteella on tehty oletus, että syntyvästä jätevesilietteestä 65 prosenttia kompostoidaan, 30 prosenttia mädätetään, 4 prosenttia poltetaan ja 1 prosentti sijoitetaan kaatopaikalle (kuten esitetty myös kuvassa 10). On huomattava, että mikäli on tiedossa tarkka alue, jossa jätevesiliete syntyy, suositellaan laskennassa käytettävän sille alueelle tyypillisiä osuuksia eri käsittelymenetelmiin tai niiden yhdistelmiin.

Riippuen laitoksesta, liete voidaan käsitellä jätevedenpuhdistamon alueella, tai se voidaan kuljettaa käsittelyyn laitoksen ulkopuolelle. Vesi- ja viemärilaitoksen vuonna 2005 teettämän kyselyn mukaan 30 % laitoksista käsittelee jätevesilietteen puhdistamon alueella, 50 % laitoksista kuljettaa kuivatun lietteen 0-15 km päähän käsiteltäväksi, ja 20 % yli 15 km päähän (Pöyry Environment 2007). Koska lietteen kuljetusmatkat pyritään pitämään mahdollisimman lyhyinä kuljetusten haasteellisuuden ja kalleuden takia, ja edellä esitetyt kilometrilukemat osoittavat, että lietteen kuljetusmatkat ovatkin suhteellisen lyhyitä, voidaan todeta, että lietteen kuljetuksia ei oteta tarkastelussa huomioon. Tällöin siis ei tarkastella kuljetuksesta aiheutuvia suorja ravinnepäästöjä pakokaasujen kautta,

epäsuoria päästöjä polttoaineiden tuotannosta tai käytettyjä ravinnesyötteitä polttoaineiden tuotannossa. On myös huomioitava, että kuljetuskalusto voi vaatia hygienisointia ja pesua, mikäli sillä kuljetetaan myös muuta materiaalia jonka ei haluta kontaminoitua käsittelemättömästä lietteestä (Pöyry Environment 2007). Tätä vaihtoehtoa, ja pesuaineiden mahdollista fosforisisältöä, ei kuitenkaan huomioida tarkastelussa.

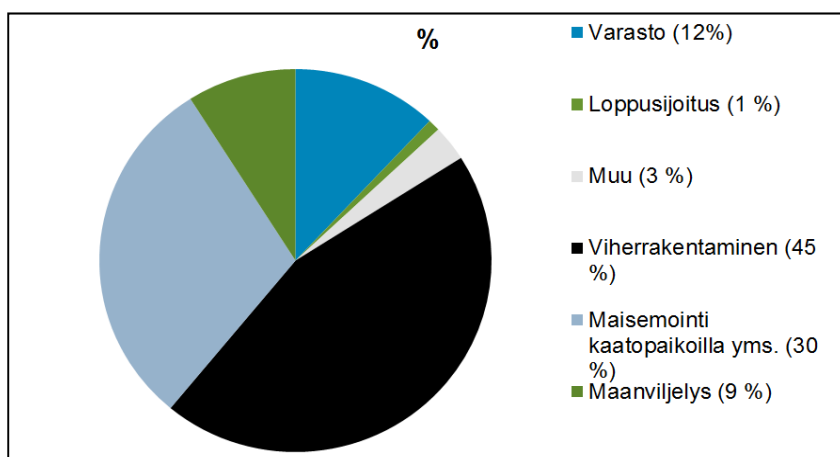
Jätevesilietteen, mädätyksen ja kompostoinnin lopputuotteiden käyttökohteet

Kuten luvun 3.10 alussa todettiin, on pyrittävä määrittämään, mikä osuus biojätteestä ja yhdyskuntien jätevesilietteestä edustaa suljettua kiertoa (eli päätyy takaisin maatalouteen), mikä osuus käytetään hyödyksi lannoitteena muissa käyttötarkoituksissa kuin maataloudessa, ja mikä osuus päätyy muuhun kuin lannoitehyötykäyttöön (eli ravinne katsotaan hukatuksi).

Jätevesilietteiden loppukäyttökohteita on kuitenkin vaikea arvioida, koska reitit lopputuotteeksi ovat hyvin moninaisia. Osa käsitellystä lietteestä käytetään sellaisenaan materiaalihyötykäytössä, osa sekoitetaan muihin jätteisiin ja aineksiin ja ne kulkeutuvat erilaisissa muodoissa hyötykäyttöön.

Jätevesilietteestä maatalouskäyttöön päätyvää osuutta voidaan arvioida helpommin, koska sitä tilastoidaan erikseen. Tosin voidaan olettaa, että myös osa pienempien laitosten lannoitusvalmisteista tai maanparannusaineista päätyy maatalouskäyttöön, mutta näitä ei näy tilastoista. (Espo 2013.) Kuitenkin, Tilastokeskuksella on saatavilla seuraavat tiedot yhdyskuntajätevesien käsittelystä syntyvien lietteiden loppukäyttökohteista vuonna 2011: maanviljelykseen päätyy 2.7 %, kaatopaikalle 1.2 % ja muuhun hyödyntämiseen 96.1 %. Muu hyödyntäminen pitää sisällään viherrakentamista, hyödyntämistä raaka- tai apuaineena, tai maa- ja vesirakennusmateriaalina tai energiana. (Ympäristötilasto 2013). Näissä tavoissa ovat ravinnejalanjäljen määrittämisen kannalta oleellisia eroja, kuten tämän luvun alussa on esitetty. Näin ollen on pyrittävä arvioimaan tarkemmin, missä määrin muu hyödyntäminen on nimenomaan ravinteiden hyödyntämistä, ja missä määrin täyteaineena tai maanpeitteinä hyödyntämistä.

Etelä- ja Länsi-Suomen alueen jätevedenpuhdistamon lietteiden käyttökohteista (Lindsberg & Vilpas 2009) on saatavilla tarkempaa, joskin hieman vanhempaa tietoa (tiedot vuosilta 2004–2007) kuvassa 10. Kuvan mukaisesti lietteestä 9 % käytetään maataloudessa hyväksi, joka on suurempi arvio, kun v. 2011 (2.7 %). Lietteiden hyödyntäminen maataloudessa onkin hiljalleen hiipunut Suomessa 2000-luvun alkuvuosista, jolloin lietettä hyödynnettiin maataloudessa lähemmäs 15 prosenttia (VVY 2011).



Kuva 10. Käsitellyn puhdistamolietteiden hyödyntäminen Etelä- ja Länsi-Suomen alueella (Lindsberg & Vilpas 2009)

Tuoreimpien tietojen valossa siis tiedetään, että Suomessa jätevedenpuhdistamon lietteistä maatalouskäyttöön päätyy 3 % ja kaatopaikalle 1 % (Ympäristötilasto 2013). Jäljelle jäävä 96% hyö-

dynnetään muutoin, mutta ravinnejalanjäljen määrittelemisen kannalta olisi tärkeää tietää, millainen osuus menee lannoitehyötykäyttöön, ja millainen osuus muuhun käyttötarkoitukseen (kuva 10).

Arvioidaan jätevesilietteen osuuksia muihin käyttökohteisiin yllä olevan kuvan (Lindsberg & Vilpas 2009) suhteiden avulla: Koska tasan puolet muista käyttökohteista kuin maanviljelyksestä ja kaatopaikkasijoituksesta menee viherrakentamiseen, oletetaan samassa suhteessa että 48,5% lietteestä käytetään viherrakentamisessa ja ravinteesta oletetaan saavan tällöin lannoitehyötyä, ja loput 48,5% menee muihin käyttökohteisiin, joita ei pidetä ravinnetalouden kannalta arvokkaina.

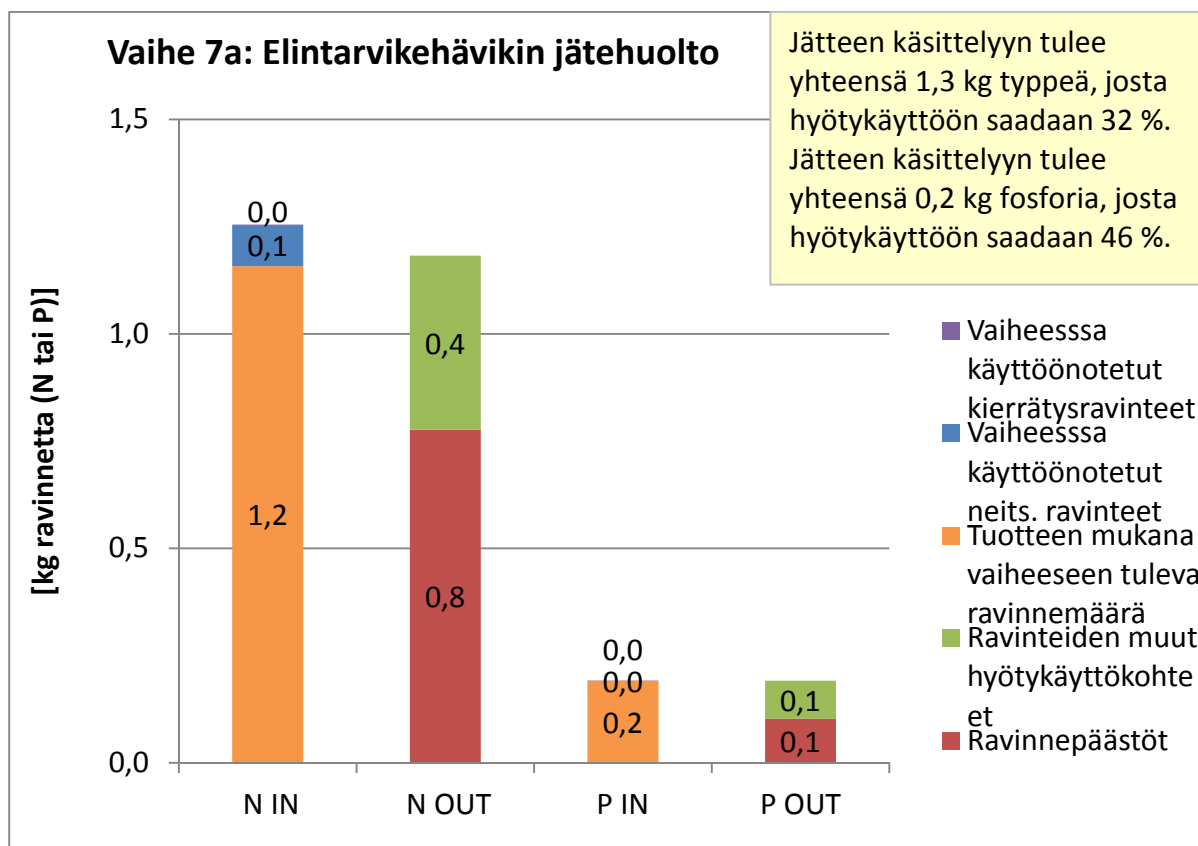
Mädätysprosessista syntyvä mädätysjäännös soveltuu usein lannoite- ja maanparannuskäyttöön (Lehtomäki et al. 2007). Lannoitevalmistekäyttö sisältää sekä maanviljelys- että viherrakentamistarkoitukset. Lannoitusvalmisteena käytettävän materiaalin tulee olla tasalaatuista, turvallista, käyttötarkoitukseensa sopivaa ja sen täytyy täyttää sivutuoteasetuksessa, lannoitevalmistelaisissa ja sen nojalla annetuissa säädöksissä asetetut vaatimukset. Markkinoilla saatavilla lannoitevalmisteilla tulee olla laissa määritelty tyyppinimi (Latvala 2009). Mädätysjäännös voidaan tuotteistaa lannoitevalmisteksi monin eri tavoin, kuten kuivattamalla mädätysjäännöstä mekaanisesti (tyyppinimenä mädätysjäännös), vanhentamalla (tuorekomposti), kompostoimalla (tuorekomposti, maanparannuskomposti, kompostimulta, pakattu seosmulta) tai lämpökuivauksella (kuivarae tai -jauhe) (Partanen 2010).

Mädätys muuttaa orgaanista tyypeä ammoniummuotoon, jolloin se haihtuu alttiimmin levittäessä ja varastoidessa. Mädätysjäännös saattaa sisältää myös paljon hajoamatonta orgaanista ainesta, joka käyttökohteessa hajotessa sitoo maassa vapaana olevaa tyypeä hajoamisprosessiin. (Vesilaitosyhdistys, 2013b)

Komposti voidaan jakaa kahteen ryhmään: tuorekompostiin eli puolikypsään kompostiin sekä kypsään kompostiin. Tuorekomposti on pitkälle hajonnutta, mutta ei ole muuttunut kokonaan hitaaksi hajoavaksi eloperäiseksi aineeksi ja humukseksi, jollaista kypsä komposti on. Tuorekompostin ravinnevaikutus on suurempi kuin kypsän, koska kasveille helposti käytettävien ravinteiden määrä on suurempi tuoreessa kompostissa. Tuoretta kompostia voidaan käyttää viljoille, perunoille sekä puutarhakasveista runsasta lannoitusta tarvitseville. Kypsää kompostia voidaan käyttää useammille puutarhakasveille lannoitteena sekä maanparannusaineena maanrakennetta kuohkeuttamaan. (Rajala 2006.) Ravinnejalanjälkilaskennassa ei kuitenkaan oteta huomioon sitä, kuinka hyvin lannoitekäyttöön päätyvä ravinne saadaan todella käytettyä hyödyksi.

Kompostoinnin ja mädätyksen lopputuotteen käyttökohteista ei ole tehty tilastointia, mutta Biolaitosyhdistyksen asiantuntija-arvion (Gareis ja Pirkkamaa 2014) mukaan n. 65 % käytetään maanviljelyksessä. Kompostia ja mädätettä käytettäessä mullanvalmistukseen tai viherrakentamiseen haetaan sekä lannoite- että maanparannusvaikutusta. Biolaitosyhdistyksen asiantuntija-arvion mukaan oletetaan, että loput 35 % kompostoinnin ja mädätteen lopputuotteesta käytetään hyväksi lannoitteena ja luokitellaan ne hyötykäyttöravinteiksi. Nämä prosenttiosuudet on esitetty myös edellä kuvassa 10.

3.10.1. Jätehuoltovaiheen tulokset

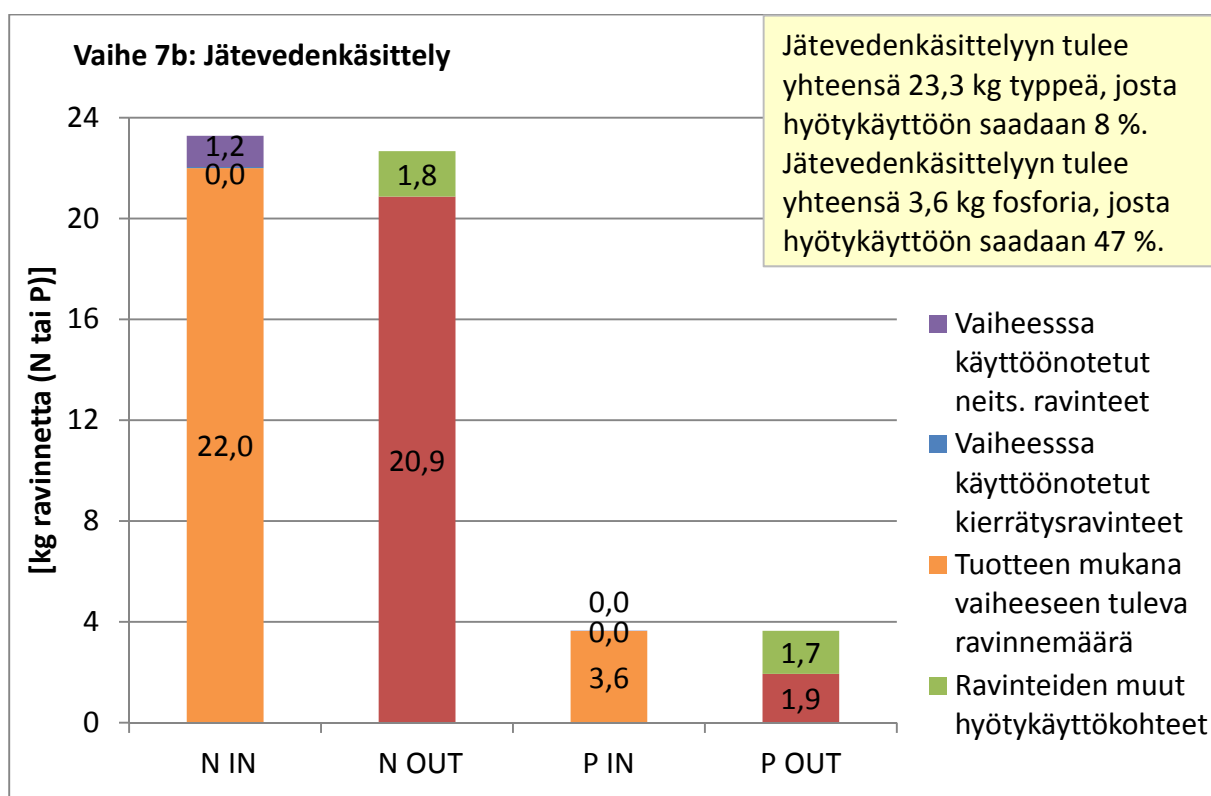


Kuva 11. Elintarvikehävikin jätehuolto

Kiinteän jätteen jätehuoltoon ravinteet tulevat pääosin kuluttamatta jääneen tuotteen sisältämien ravinteiden mukana (kuva 11). Vaiheessa otetaan käyttöön pieni osa neitseellisiä ravinteita ja nämä ovat peräisin kompostoinnin tukiaineen sisältämän hakkeen typpisisällöstä ja käytetyn sähkö- ja lämpöenergian ravinteista sekä liikennepolttoaineiden sisältämästä typestä.

Kiinteän jätteen sisältämästä typestä saadaan hyötykäyttöön vain kolmannes ja fosforistakin alle puolet. Suurin osa ravinteista hukataan jo jätteiden lajitteluvaiheessa. Laskennassa on oletettu, että puolet elintarvikehävikistä menee sekajätteen joukossa kaatopaikalle tai energiahyötykäyttöön, jolloin sen sisältämiä ravinteita ei saada talteen. Asiantuntija-arvion mukaan (Gareis ja Pirkkamaa 2014) tilanne biojätteen saannon suhteen saattaa olla todellisuudessa tätäkin huonompi, jolloin elintarvikehävikin jätehuollon ravinteiden käytön tehokkuus pienenesi entisestään.

Biojätteestä, joka on saatu talteen, suurin osa (74 %) kompostoidaan joko laitospöytäkompostissa tai kotikompostissa, noin viidennes mädätetään ja erilliskerätystä biojätteestä myös osa (7 %) menee ravinnetalouden kannalta hukkaan energiahyötykäyttöön tai kaatopaikalle. Kompostoinnissa tapahtuvien typpipäästöjen vuoksi ravinteista hyötykäyttöön saatu osuus on pienempi typpellä kuin fosforilla. Mädätyksessä ravinteiden talteen saanti on täydellisempää kuin kompostoinnissa. Epävarmuutta mädätysjäännöksen ja mädätyksen rejektiveden hyötykäyttöön kuitenkin tuo se, kuinka suuri osuus näistä todella saadaan ravinnehyötykäyttöön. Nyt on oletettu, että kaikki mädätyksestä sekä kompostoinnista saatu aines saadaan hyötykäytettyä ravinteena



Kuva 12. Jätevedenkäsittely

Myös jätevedenkäsittelyssä suurin sisään tuleva ravinnekuorma tulee luonnollisesti jäteveden sisältämistä ravinteista, jotka ovat peräisin ihmiselimestön läpikäyneistä kaurahiutaleista. Jätevedenpuhdistuksessa ja sitä seuraavissa lietteen käsittelyprosesseissa otetaan käyttöön pieni määrä neitseellisiä ravinteita energian ja kompostointiprosessin tukiaineen muodossa (kuva 12).

Tuloksista nähdään, kuinka pieni osa varsinkin jäteveden sisältämästä tpeestä saadaan hyötykäyttöön. Jätevedenpuhdistamolla oletettu keskimääräinen puhdistusteho, 56 % typelle, johtaa siihen, että suuri osa tpeestä menetetään jo puhdistamolla purkuvesiin. Lisää tpeä menetetään lietteen kompostointiprosessissa, mutta vielä enemmän kompostoidun ja mädätetyn lietteen käyttökohteissa. Laskennassahan oletettiin, että vain noin reilu puolet talteen saadusta, käsitellystä lietteestä päätyy ravinneyhyötykäyttöön, ja vajaa puolet ravinnetalousmielessä hukataan muihin käyttökohteisiin.

Fosforista hyötykäyttöön saadaan jonkin verran enemmän, sillä jätevedenpuhdistamoiden keskimääräinen puhdistustehokkuus fosforille paljon parempi kuin typelle, 96 %. Mutta vastaavasti kuin typellä, fosforivuotoja tapahtuu, kun lietettä poltetaan, sijoitetaan kaatopaikalle, tai käytetään muussa tarkoituksessa kuin ravinneyhyötykäytössä.

3.11. Energiantuotanto

Taulukko 11. Ravinteiden luokitus: Energiantuotanto

| Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttö-ravinteet |
|---|--|---|---|
| Sähkö- ja lämpöenergian tuotannoissa käytettävien polttoaineiden sisältämä typpi ja fosfori sekä palamisilman typpi ja typen pelkistämiseen käytettävän kemikaalin typpisisältö | Kierrätyspolttoaineilla tuotettu sähkö/lämpö | Energian tuotannossa syntyvät päästöt typpipäästö ilmaan (N_2O , NO_x , NH_3 , N_2) sekä typpipäästöt veteen ja osuus polttotuhkasta ja sen sisältämästä fosforista, jota ei hyötykäytetä lannoitteena. | Osuus turvetta ja puuta poltettaessa syntyneestä tuhkasta ja sen sisältämästä fosforista, jota käytetään lannoitevalmisteenä. |

Ravinteita saapuu energian tuotantoon polttoaineen muodossa: energian tuotantoon käytetään Suomessa kotimaista puuta ja turvetta, sekä ulkomailta tuotua hiiltä, maakaasua sekä öljyä. Lisäksi energian tuotantoon eri sektoreilta saapuvia jätevirtoja, jotka sisältävät myös ravinteita (Saikku et al. 2007.)

Teollisissa prosesseissa vapautuu typen oksideja erilaisten reaktioiden johdosta. Vain pieni osa ilmakehään vapautuneista typen oksideista palautuu maatalousmaahan, jolloin laskeuman sisältämät ravinteet voivat osallistua kasvin ravitsemukseen. Laskeuma on yleisimmin typpihapon anioneita, jolloin ammoniumia liukenee maaperän veteen yhdisteen laskeutuessa maahan.

Polttoprosesseissa kaikki orgaanisen aineksen typpi vapautuu ilmaan, minkä takia polttoaineen sisältämää orgaanista tyyppiä voidaan kutsua "polttoaine-tyypeksi". Typen muuntumiseen osallistuu myös polttoon käytetyn ilman N_2 , mikä osittain myös muuntuu haitalliseksi typen yhdisteiksi. Poltossa vapautuu prosessista riippuen typen oksideja (NO_x), dityppioksidia (N_2O), ammoniakkia (NH_3) sekä inertti-typpikaasuna (N_2). Inertti-typen pitoisuus on kuitenkin mitätön verrattuna muihin haihtuviin typen komponentteihin. Polttoprosesseihin vaaditun ilman sisältämä typpi (N_2) otetaan myös huomioon siltä osin, mikä osuus polttoprosesseissa muuntuu reaktiiviseksi typen komponenteiksi. Niin sanottua ilman läpivirtaus-typpiä ei oteta huomioon. Tämän lisäksi huomioidaan typen oksidien pelkistämiseen molekyylitypeksi käytettävän kemikaalin sisältämä typpi. Laskelmissa on oletettu, että savukaasuihin lisättävä pelkistyskemikaalina toimii ammoniakki. Haasteena polton päästöjen laskennassa on se, että syntyvien typpipäästöjen määrät riippuvat paljon prosessiolosuhteista, kuten palamislämpötilasta, palamisilman määrästä, sekä käytössä olevista poltto- ja puhdistustekniikoista. Kun lasketaan energiantuotannon ravinnejalanjälkeä ketjun kehittämistarkoituksessa, on hyvä selvittää todelliset prosessiolosuhteet ja käytetyt tekniikat. Esimerkilaskennassa on kuitenkin nyt yksinkertaistettu laskentaa olettamalla, että 80 % NO_x -päästöistä on peräisin polttoaineen sisältämästä tyypestä ja 20 % on peräisin palamisilman tyypestä.

Fosfori on hyvin merkityksetön useimmissa polttoaineissa lukuun ottamatta turvetta ja hiiltä (Sutton et al. 2013). Polttoaineen sisältämä fosfori säilyy polttoprosessissa ja siirtyy tuhkan mukana joko kaatopaikalle, aineskäyttöön rakennusteollisuuteen tai lannoituskäyttöön tuhkalannoitemuodossa. Lannoitevalmisteenä voidaan käyttää vain puhtaan puun ja turpeen polton tuhkaa (Lillman et al. 2009). Puhtaan puun ja turpeen polton tuhkaa käytetään kuitenkin melko vähäisessä määrin lannoitustarkoituksiin, arviolta noin 10–15 % (Ojala 2010). Näin ollen laskennassa voidaan olettaa, että n. 15 % energian tuotannossa käytetystä turve- ja puupolttoaineen sisältämästä fosforista päätyy hyötykäyttöön, kun loput katsotaan ravinnejalanjäljessä vuodoksi fosforin mennessä tuhkan mukana esimerkiksi kaatopaikalle tai rakennusmateriaaliksi.

Sekä liikennöinti että energian tuotanto perustuvat polttoaineiden polttoprosesseihin niiltä osin, kun käytössä ei ole uusiutuvaan energiaan pohjautuvia energiantuotantomuotoja. Käytännössä kat-

soen aurinko-, tuuli- ja vesivoima eivät kuluta lainkaan luonnon ravinteita, eivätkä lisää tarkasteltavan ketjun ravinnepanoksia. Sen sijaan muiden energialähteiden mukana elintarvikeketjun käyttöönottama ravinnemäärä määritetään polttoaineiden sisältämän typpi- ja fosforipitoisuuden mukaan. Energian tuotantoon tarvittuja neitseellisiä ravinteita ovat ravinteet niissä polttoaineissa, jotka on otettu käyttöön vain energian tuotantoa varten. Kierrätysravinteilla tarkoitetaan energian tuotantoon kulutetun kierrätyspolttoaineen sisältämiä ravinteita. Kierrätysravinteita ovat siis mm. metsäteollisuuden mustalipeän ja muiden lietteiden sekä poltettavan jätteen sisältämät ravinteet.

Koska ravinnejalanjäljellä kuvataan osaltaan ruuantuotannon kestävyyttä, tilanteessa, jossa energiantuotantoon viljellään energiakasveja, huomioidaan muista polttoaineista poiketen myös valmistuksen aikainen ravinnetalous. Energiakasvin tuotannon kohdalla tämä tarkoittaa viljelyssä tarvittujen ravinteiden käyttöönoton huomioimista (lannoitteiden sisältämät ravinteet, teollinen lannoitevalmistus huomioiden hävikit, siementen ravinteet, muiden panosten sisältämät ravinteet). Tällä tavoin huomioidaan se mahdollisuus, että viljelyalaa olisi voitu käyttää energiakasvin viljelyn sijaan myös ruokatuotantoon.

Laskennassa on käytetty sähkön kulutuksen osalta keskimääräistä Suomen sähkön tuotantoa ja sen polttoainejakaamaa. Polttoaineiden ominaisuudet, joita tarvitaan käytetyn otetun ravinteiden määrän laskentaan eli typpipitoisuudet ja fosforipitoisuudet kuiva-aineessa ja tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa perustuvat Alakankaan (2000) kokoamiin tietoihin Suomessa käytetyistä polttoaineista.

Lämpöenergian käyttöön ottamat ravinteet ja energian tuotannon aiheuttamat ravinnepäästöt ovat laskettu vastaavalla tavalla käyttämällä Alakankaan (2000) arvoja polttoaineiden ravinnepitoisuuksista Kaukolämmön polttoainejakaumana on käytetty Energiateollisuuden julkaisemia tietoja vuoden 2012 kaukolämmön tuotannosta ja polttoainejakaumasta (Wilhelms ja Tanner-Faarinen 2013).

3.12. Kuljetukset

Taulukko 12. Ravinteiden luokitus: Kuljetukset

| Neitseelliset ravinteet | Kierrätysravinteet | Ravinnehäviöt | Hyötykäyttö-ravinteet |
|---|--|---|-----------------------|
| Polttoaineen (diesel, raskas polttoöljy, kevytpolttoöljy) sisältämä typpi | Kierrätyspolttoaineista valmistettu polttoaine | Polttoaineen valmistuksessa syntyvät typpipäästöt (N ₂ O ja NO _x) | |
| | | Polttoainetta poltettaessa syntyvät pakokaasupäästöt (NO _x , N ₂ O ja NH ₃) | |

Taulukko 13. Tarkastelun rajaukset kuljetusten osalta

| Tarkastelussa huomioidaan: | Tarkastelun ulkopuolelle rajataan: |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Panostuotteiden kuljetukset maatilalle - Työkonetoiminnot maatilalla - Kuljetukset maatilalta jatkojalostukseen - Elintarvikkeen kuljetukset keskusvarastoon - Jätekuljetukset | <ul style="list-style-type: none"> - Kaikki paluumatkat - Raaka-aineiden kuljetukset maatalouden panosten valmistukseen - Kuljetukset maatilan sisällä / maatilojen välillä - Elintarvikkeen kuljetukset keskusvarastolta kauppaan - Kuluttajan liikennöinti kodin ja kaupan/ravintolan välillä - Työntekijöiden liikennöinti - Lietteen kuljetus |

Kuljetuksista on huomioitava kuljetusetäisyys, polttoaineen kulutus ja sen perusteella polttoaineen valmistusprosessi (siinä tarvittavat ravinnepanokset sekä typpipäästöt (N_2O ja NO_x) sekä pakokaasujen typpipäästöt, joita ovat NO_x , N_2O ja NH_3). Dieselin typpipitoisuus on hyvin pieni, ns. raaka dieselin osalta 392 ppm (0,0392 %) ja prosessoidun polttoainedieselin osalta 140 ppm (0,014%) (Hughey et al. 2001). Polttoaineen kulutuksen ja päästötietojen lähteenä käytetään usein VTT:n ylläpitämää Lipasto-tietokantaa (Lipasto 2012). Kuljetuksista on hyvä tietää, minkä kokoisella ajoneuvolla (pakettiautosta täysperävaunuun) tai millaisella välineellä (rekasta traktoriin) kuljetukset suoritetaan. Lisäksi päästöarvojen luotettavuutta parantaa, mikäli voidaan määrittellä 1) onko matka maantie- vai katuajoa, 2) mikä on lastin täyttöaste 3) minkä EURO-päästöluokkaa tyypillinen ajoneuvo edustaa.

Mikäli samassa lastissa kuljetetaan muitakin, kuin tarkasteltavia tuotteita, kohdennetaan vain osa polttoaineen kulutuksesta ja aiheutuneista päästöistä tarkasteltavalle tuotteelle. Allokointiperusteena voidaan käyttää massaa tai tilavuutta, sitä suuretta, joka rajoittaa lastin määrää. Useasti kuljetuksille annettavat polttoaineenkulutus- ja päästöarvot annetaan suoraan tonnakilometreinä, jolloin voidaan kuljetettava massa kertoa suoraan tällä arvolla sekä kuljetusmatkan pituudella.

Laskennan ulkopuolelle jätetään paluumatkat ja paluukuljetukset, sillä yleensä ei voida määrittää, tehdäänkö paluu tyhjällä lastilla ja palataanko lähtöpisteeseen vai ajetaanko jonnekin muualle. Näin ollen on myös vaikea määrittää, kuuluuko paluukuljetus tarkasteltavan elintarvikkeen elinkaareen, vai edustaako se jonkin toisen tuotteen hakua tai kuljettamista. Yksinkertaistamisen vuoksi tarkastelussa suositellaan ottamaan huomioon vain tarkasteltavan elintarvikkeen päävirtojen kuljetukset arvoketjun seuraavaan pisteeseen ilman mahdollisia paluukuljetuksia.

Laskennan ulkopuolelle jätetään kuljetuskaluston ja tarvittavan tieinfrastruktuurin valmistaminen, sillä niitä ei voida katsoa valmistettavan pelkästään tarkasteltavan elintarvikkeketjun käyttöön vaan niillä on paljon muitakin käyttötarkoituksia.

Laskennan ulkopuolelle jätetään myös kuluttajien liikennöinti kaupan ja kodin välillä, sillä ei voida määrittellä, mikä osuus liikennöinnistä tehdään tietyn elintarvikkeen vuoksi. Laskennan ulkopuolelle jätetään myös työntekijöiden kulkeminen työpaikalleen maatilalle, elintarviketehtaalle, ravintolaan, tai jätteenkäsittelylaitokselle. Laskennan ulkopuolelle rajataan myös kuljetukset keskusvarastolta kauppoihin, koska keskusvaraston ja kauppojen välinen etäisyys vaihtelee merkittävästi.

Kuljetuksista suositellaan ottamaan mukaan seuraavat, jotka voidaan tarkemmin kohdistaa juuri tietyille elintarvikkeelle tai sen raaka-aineille:

- Panostuotteiden kuljetukset maatilalle (panokset)
- Maatilan sisäiset panos- ja satokuljetukset
- Kuljetukset maatilalta jatkojalostukseen
- Elintarvikkeen kuljetukset keskusvarastoon
- Jättekuljetukset jätteen syntypaikasta käsittelypaikalle

Seuraavassa on kuvattu, kuinka edellä mainitut kuljetukset on huomioitu kaurahiutale-casessa.

- Panostuotteiden kuljetukset maatilalle

Lannoitevalmistuksessa käytetyt päästötiedot pitävät sisällään kuljetusten päästöt.

- Kuljetukset maatilalta jatkojalostukseen

Kaurahiutale-tapaustutkimuksessa on pystytty arvioimaan Raisiolta (Finér 2013) saatujen tietojen perusteella viljan keskimääräinen kuljetusmatka tiloilta Raision Nokian tehtaille. Kuljetusetäisyys on arvioitu kolmen vuoden ajanjakson perusteella painotettuna keskiarvona suurimokauran toimitusmäärän [kg] ja kuljetusmatkan [km] avulla. Keskimääräiseksi kuljetusetäisyydeksi on näin saatu 90 km/t kauraa. Kuljetukset voidaan tehdä etäisyydestä riippuen traktorilla, kuorma-autoilla tai rekoilla. Koska kuljetusvälineistä ei ole saatavilla tilastotietoa, on yksinkertaistamisen vuoksi valittu puoliperävaunuyhdistelmä. Tämä pohjautuu oletukseen, että keskimääräinen kuljetusmatka (90 km) on melko pitkä traktorilla ajettavaksi. Kuljetusten on oletettu olevan maantieajoa, koska kuljetukset lähtevät

maatiloilta. Lastien on oletettu olevan täysiä. Koska kaluston EURO-päästöluokkaa vaihtelee ajoneuvosta riippuen, on päästöarvo valittu keskimääräisen v. 2011 kaluston mukaisesti.

- Elintarvikkeen kuljetukset keskusvarastoon

Keskusvarastolle pakatut kaurahiutaleet kulkevat täysperävaunuyhdistelmän kyydissä (Finér 2013). Kuljetusten on oletettu olevan maantieajoa, koska suurin osa matkasta Nokian ja pääkaupunkiseudulla sijaitsevien keskusvarastojen välillä on muuta kuin kaupunkiajtoa. Kuormien on oletettu olevan täysiä, ja rekan kyydissä ei samalla kuljeteta muita tuotteita, jolloin myöskään allokointitarvetta ei synny.

- Jätekuljetukset jätteen syntyapaikasta käsittelypaikalle

Jätekuljetusten etäisyyksiä on vaikea arvioida tilanteessa, jossa ei tiedetä jätteensyntypaikkaa - elintarvikkeethan on voitu käyttää missä hyvänsä. Tässä tilanteessa käytetään Tilastokeskuksen tilastoa keskimääräisistä kuljetusmatkoista ja kuormausasteista kotimaan liikenteessä tavaralajeittain (Suomen virallinen tilasto 2012). Tämän tilaston mukaan keskimääräinen kuljetusmatka talousjätteille ja muille jätteille on 58 km ja keskimääräinen kuormausaste 63 %. Kyseinen tilasto (http://tilastokeskus.fi/til/kttav/2012/kttav_2012_2013-05-08_tau_010_fi.html) voi olla myös muissa tarkoituksissa hyödyllinen, ellei muutoin pystytä määrittelemään erinäisten hyödykkeiden keskimääräisiä kuljetusetäisyyksiä.

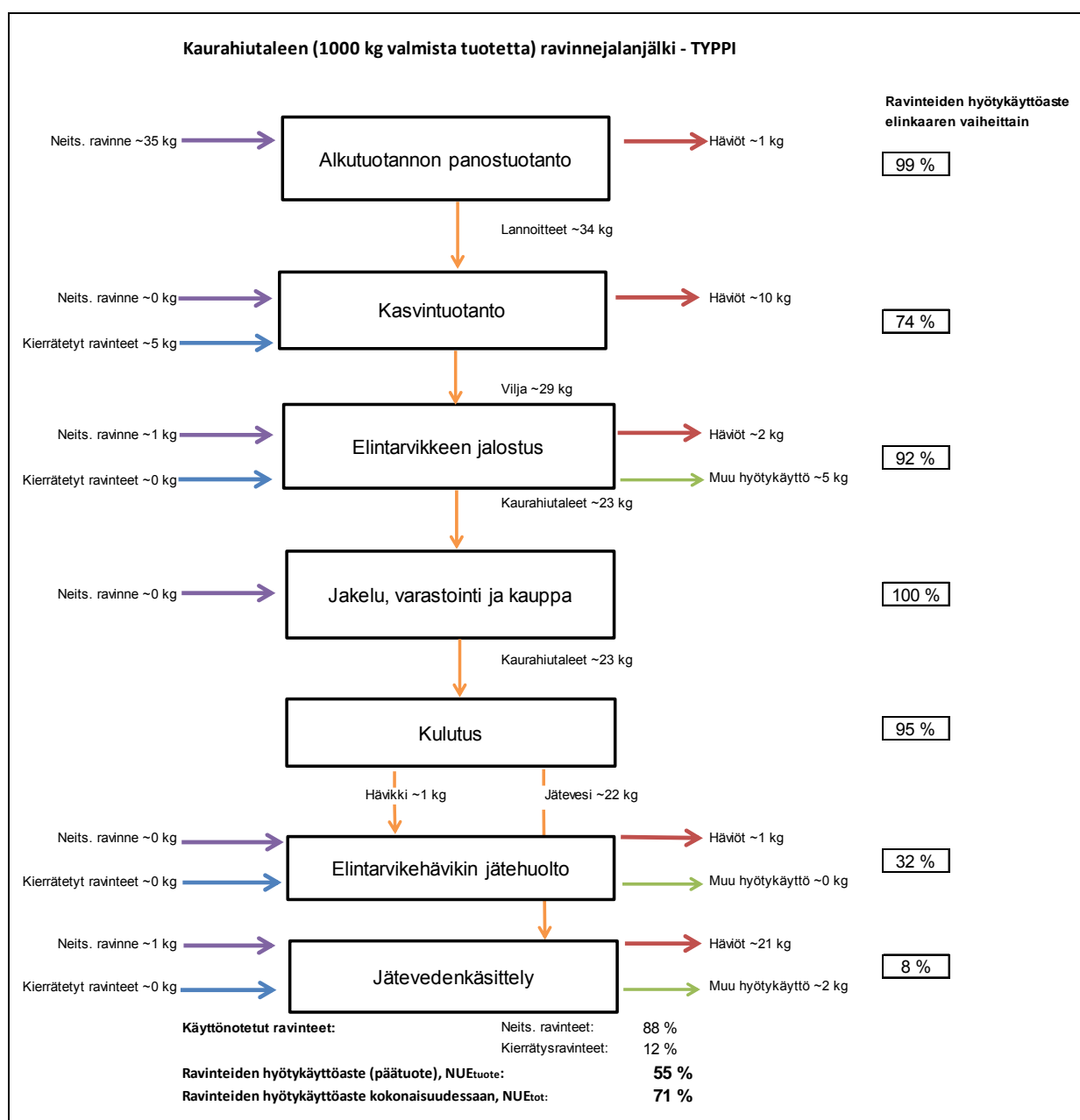
4. Kokonaistulokset

Kuvassa 13 on esitetty koko kaurahiutaleketjun ravinnejalanjälki typen osalta, kun toiminnallisena yksikkönä on 1000 kg kaurahiutaletta. Kuvassa 13 on esitetty vastaavat tulokset fosforille. Kuvissa on esitetty pyöristettyinä arvoina ravinteiden päävirrat kussakin elinkaaren vaiheessa: käyttöön otetut neitseelliset ravinteet (violetti nuoli) ja kierrätysravinteet (sininen nuoli), syntyvät ravinnehäviöt eli ravinnepäästöt (punainen nuoli), hyötykäyttöön menevät ravinnevirrat (vihreä nuoli), sekä ketjun läpi siirtyvät, yleensä tuotteeseen tai sen raaka-aineisiin tai tuotteesta syntyvään jätteeseen sitoutuneet ravinnevirrat (oranssi nuoli).

Kuvissa oikealla laidalla nähdään ravinteiden hyötykäyttöaste kokonaisuudessaan kussakin elinkaaren vaiheessa, (eli samat tulokset, jotka esitettiin aiemmin kunkin elinkaarenvaiheen esittelyn yhteydessä). Yhteenvedona näistä tuloksista voidaan sanoa, että varsinkin jätehuollossa olisi kehitettävää ravinteiden hyötykäytön tehostamiseksi. Varsinkin typen osalta tilanne on huono, sillä tässä laskennassa tehdyillä oletuksilla, jätevedenkäsittelyssä vain 8 % jätevedenkäsittelyyn tulevasta typestä saadaan hyötykäyttöön. Typen osalta elintarvikehävikin käsittely jätteenä on myös melko alhainen, kun typen kokonaishyötykäyttöaste on 33 %. Fosforin osalta tilanne on hieman parempi, elintarvikehävikin jätteenkäsittelyn sekä jätevedenkäsittelyn fosforin hyötykäyttöasteen ollessa molemmissa noin 45 %.

Fosforin kohdalla nähdään, että lannoitteen raaka-aineiden hankinnassa ja valmistuksessa tapahtuvat häviöt alentavat fosforin hyötykäyttöastetta alkutuotannon panostuotannossa. Muutoin elinkaaren vaiheissa päästään melko korkeisiin hyötykäyttöasteisiin. On kuitenkin muistettava, että tuotteen hävikkimäärät saattavat olla suurempia varsinkin jakelu, varastointi, ja kauppa -vaiheessa, mikä luonnollisesti heikentäisi vaiheen ravinteiden hyötykäyttöastetta.

Edellinen pätee myös typen ravinnejalanjälkeen, eli arvioitua suuremmat hävikkimäärät heikentäisivät vastaavasti typen hyötykäyttöastetta. Typellä jätehuollon lisäksi kasvintuotantovaihe nousee esille hieman muita elinkaarenvaiheita heikompana, kasvintuotannossa melko merkittävä osa tuestä huuhtoutuu tai haihtuu ravinnehäviöinä.



Kuva 13. Kaurahiutaleen kokonaisketjun ravinnejalanjälki tyypin osalta

Kaurahiutaleketju, kun tuotetaan 1000 kg hiutaleita, ottaa kokonaisuudessaan käyttöön n. 42 kg typpeä. Tästä määrästä 88 % on neitseellisiä ravinteita 12 % kierrätysravinteita. Selkeästi merkittävin osa neitseellisestä tyypestä otetaan ketjussa käyttöön alkutuotannon panostuotantovaiheessa ilman tyypinä typpilannoitetta valmistaessa. Vastaavasti suurin osa kierrätetystä tyypestä tulee ketjuun kasvintuotantovaiheessa lannan ja siementen mukana.

Kun huomioidaan vain ketjun päätuote, ja siitä saatava hyöty, saadaan ketjun hyötykäyttöasteeksi tyypin osalta 55 % (kun kaurahiutaleisiin sitoutunut typpimäärä, n. 23 kg jaetaan ketjun käyttöön ottamalla kokonaistyyppimäärällä n. 42 kg). Kun otetaan huomioon myös ravinteiden muut hyötykäyttökohteet kuin itse tuote, eli jalostusvaiheen sivutuotteet ja jätehuoltovaiheesta ravinnehyötykäyttöön päätyvät jakeet, saadaan tyypin kokonaishyötykäyttöasteeksi 71 % (kun lasketaan yhteen kaurahiutaleisiin sitoutunut typpimäärä, n. 23 kg ja muuhun hyötykäyttöön menevä typpimäärä, n. 7 kg, ja jaetaan summa ketjun käyttöön ottamalla kokonaistyyppimäärällä n. 42 kg).

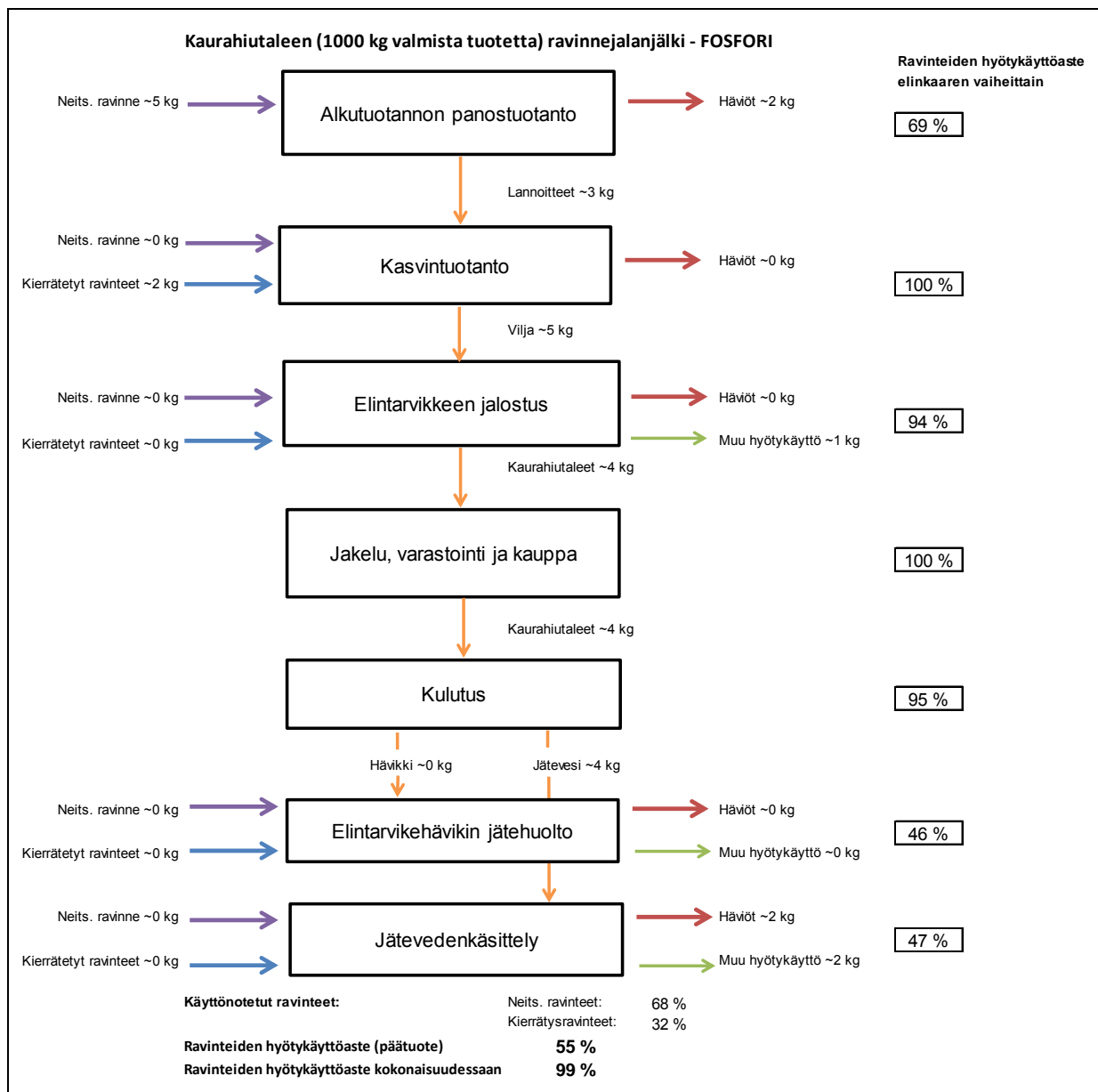
Typen osalta kaurahiutaleiden ravinnejalanjäljen voidaan sanoa olevan seuraava:

Tuoteketjua varten otettiin 42 kg typpeä käyttöön,

josta hyödynnettiin tuotteessa 55 %,

ja kaikki hyötykäyttö huomioonottaen 71 %.

Käyttönotetuista ravinteista 88 % oli neitseellisiä ja 12 % kierrätysravinteita.



Kuva 14. Kaurahiutaleen kokonaisketjun ravinnejalanjälki fosforin osalta

Kaurahiutaleketju ottaa kokonaisuudessaan käyttöön n. 7 kg fosforia. Tästä määrästä 68 % on neitseellistä ravinnetta ja 32 % kierrätysravinteita. Vastaavasti kuten typellä suurin osa neitseellisestä fosforista tulee ketjuun lannoitteen mukana. Kierrätetty fosfori otetaan käyttöön kasvintuotantovaiheessa, jossa suurin osa kierrätysfosforista on maaperässä jo ollut fosforivarantoa sekä lannan mukana tulevaa fosforia.

Kun huomioidaan vain ketjun päätuote, ja siitä saatava hyöty, saadaan ketjun hyötykäyttöasteeksi fosforin osalta 55 % (kun kaurahiutaleisiin sitoutunut fosforimäärä, vajaa. 4 kg jaetaan ketjun käyttöön ottamalla kokonaisfosforimäärällä n. 7 kg). Kun otetaan huomioon myös ravinteiden muut hyötykäyttökohteet kuin itse tuote, eli jalostusvaiheen sivutuotteet ja jätehuoltovaiheesta ravinne-

hyötykäyttöön päätyvät jakeet, saadaan fosforin kokonaishyötykäyttöasteeksi 99 % (kun lasketaan yhteen kaurahiutaleisiin sitoutunut fosforimäärä, vajaa 4 kg ja muuhun hyötykäyttöön menevä typpimäärä, n. 3 kg, ja jaetaan summa ketjun käyttöön ottamalla kokonaistypin määrällä n. 7 kg). Fosforin osalta ravinteiden kierto hyötykäyttöön siis toteutuu kokonaisuudessaan paljon paremmin kuin typen osalta. Suurin ero tähän on jätevedenkäsittelyssä, jossa fosfori saadaan typpeä paremmin talteen.

Fosforin osalta kaurahiutaleiden ravinnejalanjäljen voidaankin sanoa olevan seuraava:

- Tuoteketjua varten otettiin 7 kg fosforia käyttöön,
- josta hyödynnettiin tuotteessa 55 %,
- ja kaikki hyötykäyttö huomioonottaen 99 %.
- Käyttöön otetuista ravinteista 68 % oli neitseellistä ja 32 % kierrätysravinteita.

4.1. Herkkyystarkastelukohteet

Esimerkkilaskennan puitteissa ei tehty herkkyystarkasteluja, koska tarkoituksena oli vain demonstroida ravinnejalanjälkilaskenta käytännössä. Seuraavassa on kuitenkin spekuloitu potentiaalisia herkkyystarkastelukohteita.

Suuria massoja (ravinnepitoisuuksia) koskevat arviot ovat tärkeä herkkyystarkastelukohde. Tällainen on mm. teollisten lannoitteiden valmistuksessa syntyvät hävikit fosforille, jotka on oletettu olevan kansainvälisten selvitysten mukaan fosforin louhinta- ja rikastusvaiheessa 18 %, ja lannoitevalmistus- ja jakeluprosesseissa 16 %. Kyseisten hävikkiprosenttien muuttuessa esim. 25 % suuremmaksi tai pienemmäksi vaikuttaa oleellisesti fosforin ravinnejalanjälkitulokseen.

Jätehuoltovaihe osoittautui tuloksien valossa merkittäväksi ravinteiden hukkaajana. Näin ollen valinnat, joita tehdään jätehuollon tarkastelussa vaikuttavat paljon tuloksiin, nythän valinnat on tehty keskimääräistysten perusteella. On muistettava, että tulokset saattavat muuttua paljonkin, jos käytetään prosessispesifiä tietoa juuri tietystä jätteenkäsittelymenetelmästä. Hävikkiuosuuksien määrää on hyvä tarkastella herkkyystarkastelun avulla. Myös esimerkiksi elintarvikehävikin päätyminen suuremmassa määrin sekajätteen joukkoon erilliskerätyn biojätteen sijasta kuin nyt on oletettu (50% ja 50%) voi olla tarpeen arvioida toisin, esimerkiksi 35% biojätteen erilliskeräykseen ja 65% sekajätteen joukkoon.

5. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä työssä on esitelty menetelmä ravinnejalanjäljen laskemiseksi ja demonstroitu menetelmän käyttöä elintarvikkeen avulla. Tarkasteltavaksi elintarvikkeeksi valittiin kaurahiutale ja siitä valmistettu kaurapuuro sen suhteellisen yksinkertaisen ja hyvin tunnetun tuotantoketjun takia. Raportissa on ohjeistettu ravinnejalanjäljen laskenta kussakin elinkaaren vaiheessa alkaen alkutuotannon panos-tuotannosta ja päättyen jäteveden ja elintarvikejätteen jätehuoltoon.

Ravinnejalanjälki on ravinteiden kulutuksen sekä ravinteiden käytön tehokkuuden mittari. Ravinnejalanjälkeä selvitetessä lasketaan, kuinka paljon ravinteita, tässä vaiheessa typpeä ja fosforia, otetaan käyttöön tarkasteltavan tuotteen koko elinkaaren ajalta. Käyttöön otetut ravinteet jaotellaan neitseellisiin ja kierrätysravinteisiin, jotta saadaan kuva siitä, kuinka suuri osa käytetyistä ravinteista on uutta, luonnosta otettua reaktiiviseen muotoon muutettua ravinnetta ja kuinka suuri osa on jo kierrossa olevaa kierrätysravinnetta. Seuraavaksi ravinnejalanjäljessä tarkastellaan, mihin käyttöön otettu ravinnemäärä päättyy: kuinka suuri osa siitä siirtyy itse tuotteeseen, kuinka suuri osa sivutuotteisiin, ja kuinka suuri osa hukataan. Hukatut ravinteet voivat olla ravinnehaitumia tai -huuhtoutumia, tai ravinteita, jotka päätyvät pitkäaikaiseen varastointiin tai jätteenä muuhun kuin ravinnehyötykäyttöön. Ravinteiden hyötykäyttöä on ravinteiden päätyminen itse tuotteeseen, sekä sivutuotteisiin ja muihin hyödykkeisiin, joilla katsotaan olevan sellaista käyttöä, jossa ravinteet menevät hyötykäyttöön esimerkiksi lannoitteeksi tai eläinten rehuksi. Näiden ravinneluokkien avulla lasketaan tarkasteltavalle tuotteelle toiminnallista yksikköä kohden ravinnejalanjälki: "Tuotetta varten otetaan käyttöön x kg ravinnetta (typpeä tai fosforia), josta hyödynnettiin tuotteessa y % ja kaikki hyötykäyttö huomioon ottaen z %. Käyttöön otetuista ravinteista n % on neitseellisiä ravinteita ja k % on kierrätysravinteita".

Ravinnejalanjäljen esimerkkilaskelma suoritettiin siis 1000 kg kaurahiutaleelle. Kauran viljelyyn ja kaurahiutaleiden tuotantoon liittyvät tiedot ovat peräisin todellisista prosesseista, muihin elinkaarenvaiheisiin ja toisarvoisiin ravinnevirtoihin käytettiin sekundaaridataa ja asiantuntija-arvioita. Esimerkkilaskelma tehtiin ravinnejalanjälkimenetelmän testaamiseksi, ei tuottaakseen yleispäteviä tuloksia.

Laskelman tulokset osoittavat, että kaurahiutaleketju ottaa käyttöön elinkaarensa aikana 42 kg typpeä ja 7 kg fosforia. Tyypestä 55 % hyödynnettiin tuotteessa ja kokonaisuudessaan typen hyötykäyttöaste oli 71 %. Fosforista 55 % hyödynnettiin tuotteessa ja kokonaisuudessaan fosforin hyötykäyttöaste oli 99 %. Selkeästi heikoimmat typen ja fosforin hyötykäyttöasteet (alle 50 %) ovat jäteveden käsittelyssä ja elintarvikejätteen käsittelyssä. Typen osalta kauranviljely 74% hyötykäyttöasteellaan ja fosforin osalta fosforilannoitteen valmistus 69% hyötykäyttöasteellaan edustivat seuraavaksi alhaisimpia ravinteiden hyötykäyttöä. Kaikissa muissa elinkaaren vaiheissa ravinteiden hyötykäyttö oli tehokkaampaa laskennassa tehdyillä oletuksilla.

Laskennan tuloksien perusteella voidaan sanoa, että eniten kehitettävää olisi erityisesti jätehuollossa ja sekä myös viljelyvaiheessa. Jäteveden, lietteen sekä biojätteen käsittelyssä ei saada tehokkaasti jättemateriaalin sisältämiä ravinteita takaisin maatalouteen tai muuhun lannoitekäyttöön. Viljelyvaihetta taas rasitti tarkastelualueen sijaitseminen alueella, jolla karjanhoitoa ei harjoiteta paljoa, mikä taas rajoittaa lannan käyttöä lannoitteena.

Tarkastelutapauksen ravinteiden korkeat hyötykäyttöasteet lienevät tyyppisiä tällaiselle tuotteelle, joka perustuu täysin kasvipohjaisiin raaka-aineisiin ja jolla on suhteellisen yksinkertainen jalostusprosessi. Aiempien tutkimusten perusteella (Riiko & Yli-Renko 2011) kaura käyttää esimerkiksi muihin viljoihin nähden paljon tehokkaammin pellolle laitettavat ravinnepanokset. Lisäksi kaurahiutale on tuotteena erityislaatuinen hävikin suhteen. Toki hiutalehävikkiä syntyy jossain määrin kuljetuksissa, keskusvarastoissa, kaupoissa sekä kotitalouksissa, mutta laskennassa on nyt oletettu, että kaurahiutaleelle ei hyvin säilyvänä elintarvikkeena aiheudu näissä vaiheissa ruokahävikkiä. On aiheellista olettaa, että tuotteella, joka perustuu karjan kasvattamiseen, on paljon alhaisemmat ravinteiden

hyötykäyttöasteet. Sama koskee helposti pilaantuvia elintarvikkeita, ja tuotteita, joissa on syömäkelpottomia tai poistettavia osia, kuten luita tai kuoria.

Ravinnejalanjälkimetodologia vaikuttaa käyttökelpoiselta menetelmältä kestävyden ympäristöllisen dimension tarkasteluun muiden LCA -pohjaisten menetelmien kuten ilmastonmuutos- ja rehevöitymispotentiaalin arvioinnin rinnalla. Ravinnejalanjälki tarjoaa yksinkertaisessa ja vertailukelpoisessa muodossa tietoa ravinneresurssien kulutuksesta ja käytön tehokkuudesta. Siltä osin se on rinnasteinen vesijalanjäljen kanssa vaikkakaan ei ole ravinteiden suhteellista saatavuutta samalla tapaa huomioon kuin vesijalanjälki. Tehdyn laskelman perusteella voidaan todeta ravinnejalanjäljen osoittavan potentiaalia käyttökelpoisena menetelmänä kestävyden ympäristöllisen dimension tarkasteluun muiden LCA -pohjaisten menetelmien kuten ilmastonmuutos- ja rehevöitymispotentiaalin arvioinnin rinnalla. Ravinnejalanjäljen, hiilijalanjäljen, rehevöittämispotentiaalin sekä lisäksi biodiversiteetin muutosta kuvaavan potentiaalin ja ekotoksisen jalanjäljen arviointi antaisi yhdistettyinä tuotteen ja tuotteiden ekologisesta kestävydestä jo nykyistä paljon paremman kokonaiskuvan.

Ravinnejalanjälkeä voidaan soveltaa elintarvikkeiden tuotantotehokkuuden tarkasteluun, mikä on järkevää lannoite- ja ruuantuotannon vastatessa suurimmasta osasta ravinnevirroista, mutta myös se soveltuu myös muihin bioenergian ja biomateriaalien tuotantoketjujen tarkasteluun.

Jatkossa tarvitaan lisää testauslaskelmia erilaisille tuotteille, jotta kartutetaan vertailuarvoja yleisimmille prosesseille tai päätuotteille sekä vahvistetaan metodologian toimimista erilaisissa tarkastelu-ympäristöissä. Ravinnejalanjäljen kytkeminen vesijalanjälkeen nähdään myös varteenotettava kehityssuuntana niiden yhtymäkohtien takia.

6. Lähteet

- Alakangas E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. ISBN 951-38-5740-9.
- Antikainen R. 2007. Substance Flow Analysis in Finland – Four Case Studies on N and P Flows. Yhteenveto: Ainevirta-analyysi Suomessa – neljä esimerkkitapausta typen ja fosforin virroista. Finnish Environment Institute, Finland. Helsinki 2007.
- Antikainen R. (toim.) 2010. Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 7/2010.
- Cordell D., Drangert J-O. & White S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19: 292-305.
- Espo Juha, Tilastokeskus. Sähköpostiviestit 4.9.2013, 9.9.2013 ja 23.10.2013.
- Evira. 2008. Useimmat voimalaitosten tuhkat kelpaavat lannoitevalmisteksi.[viitattu 24.10.2013] Saatavilla: <http://www.evira.fi/portal/fi/kasvit/ajankohtaista/arkisto/?bid=286>
- Finér Aki. 2013. Raisio. Sähköpostiviestit projektin aikana 2013-2014.
- Fixen P.E. 2009. World Fertilizer Nutrient Reserves - A View to the Future. *Better Crops* 9(3): 8-11.
- Hakala H. & Välimäki J. 2003. Ympäristön tila ja suojele Suomessa. Suomen ympäristökeskus, Helsinki, Gaudeamus. ISBN 951-662-875-3.
- Havukainen J, Horttanainen M, & Linnanen L. 2012 Feasibility of ASH DEC- process in treating sewage sludge and manure ash in Finland. Tutkimusraportti 26. ISBN 978-952-265-329-1.
- Heinonen M. 2013. Viikinmäen laitoksen mittaustulokset vuoden ajalta. Sähköpostiviesti 4.9.2013.
- Hartikainen Hanna. MTT. 2013. Sähköpostiviesti 22.5.2013.
- Helsel Z.R., Gustafson C. & Pederson C. 2013. Energy Use and Efficiency in Pest Control, Including Pesticide Production, Use, and Management Options *Farm Energy* - March 23, 2012. Saatavilla: <http://www.cook.rutgers.edu/~plantbiopath/faculty/helsel/helsel.html>
- HSY. 2013. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2012. HSY:n julkaisuja 2/2013. ISBN 978-952-6604-64-0 (pdf).
- Hughey C. A., Hendrickson C. L., Rodgers R. P. & Marshall A. G. 2001. Elemental Composition Analysis of Processed and Unprocessed Diesel Fuel by Electrospray Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, vol 15, pp. 1186-1193
<http://www.cook.rutgers.edu/~plantbiopath/faculty/helsel/helsel.html>
- Galloway J.N. 2008. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320, 889 (2008); DOI: 10.1126/science.1136674.
- Gareis C. ja Pirkkamaa J. 2014. Biolaitosyhdistyksen asiantuntija-arvio. Henkilökohtainen tiedonanto 13.2.2014.
- Grönroos, J., Mattila P., Regina K., Nousiainen J., Perälä P., Saarinen K. and Mikkola-Pusa J. 2009. Development of the ammonia emission inventory in Finland, Revised model for agriculture. *The Finnish Environment* 8/2009. Finnish Environment Institute Research Department.
- Jokela J.P.Y. & Rintala J.A. 2003. Anaerobic solubilisation of nitrogen from municipal solid waste (MSW). *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology* 2, pp. 67–77.
- Kaila J., Paavilainen J., Kojo R., Penttilä M. & Karhu H. 2006. Jätehuollon järjestäminen kunnan näkökulmasta. Omistajaohjauksessa huomioon otettavia asioita. Suomen Kuntaliitto, Helsinki. ISBN 952-213-125-3.
- Kampschreur M. J., Temmink H., Kleerebezem R., Jetten M. S.M. & van Loosdrecht M. C.M. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*. Volume 43, Issue 17, pp. 4093–4103.
- Kärki S. ja Kaartinen S. 2006. NPK-lannoitteiden tuotanto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Latvala M. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) - Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristö 24/2009. Helsinki: Suomen ympäristökeskus
- Lehto T. & Ekholm E. 2001. Suomalaisen kompostilaitosten toimivuus ja tehostaminen. Jaakko Pöyry Infra. Saatavilla: http://www.jly.fi/komplait_A.pdf
- Lehtomäki A., Paavola T., Luostarinen S. & Rintala J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen - Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitosten tiedonantoja 85.
- Lindsberg E. & Vilpas R. 2009. Etelä- ja Länsi-Suomen jätesuunnittelu. Taustaraportti. Yhdyskunta- ja haja-asutuslietteet. Länsi-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 04/09.
- Lillman E. & Salmenperä H. 2009. Etelä- ja Länsi-Suomen jätesuunnittelu. Taustaraportti. Tuhkat ja kuonat. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 09/09.

- Lipasto. 2012. Yksikköpäästöt, tavaraliikenne, tieliikenne. Saatavilla: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/tavara_tie.htm, [viitattu 24.9.2013].
- Maatalouslaskenta 2010. Viljelysmaan hoito / Kotieläinten olo ja lannan varastointi. Saatavilla: <http://www.maataloustilastot.fi/node/2193>
- Mavi 2007. Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2007–2013.
- Myllymaa T., Moliis K., Tohka A., Rantanen P., Ollikainen M. & Dahlbo H. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2008. Saatavilla: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39792/SYKEra_28_2008.pdf?sequence=1
- N-print 2014. WWW-lähde. <http://n-print.org/home>, viitattu 3.2. 2014.
- Nordkalk 2012. Nordkalk ja ympäristö, raportti 2012.
- Nousiainen J. Luonnonvarakeskus (Luke). 2014. Suullinen tiedonanto
- Ojala E. 2010. Selvitys puu- ja turvetuhkan lannoite- sekä muusta hyötykäytöstä. Energiategollisuus, Motiva. <http://initrogen.org/index.php/publications/our-nutrient-world/>
- Partanen E. 2010. Mädätysjäännöksen tuotteistamismahdollisuudet Kymenlaaksossa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Peltonen J. & Harmoinen T. (toim.). 2009. Ravinteet kasvintuotannossa. Keuruu: ProAgria Keskusten Liitto ja MTT. 95 s. Tieto tuottamaan 127. ISBN 978-951-808-175-6, ISSN 0357-7295.
- Prud'Homme M. 2010: World Phosphate Rock Flows, Losses and Uses. International Fertilizer Industry Association (IFA), Phosphates 2010 International Conference, 22-24 March 2010 Brussels.
- Pulkkinen H., Saarinen M., Katajajuuri J.-M., Usva K., Krogerus K., Perälä P., Regina K. 2012. LIITE 2: Elintarvikkeiden ilmastovaikutusten arvioimista yhtenäistävä maatalouden päästöjen kaavakoelma Suomen oloihin. MTT. Saatavilla: <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/hankkeet/foodprint/laskentasuositus/LIITE%20%20Kaavakoelma%207.11.2012.pdf>
- Pöyry Environment. 2007. Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys. Sitra. ISBN 978-951-563-597-6.
- Pöyry Environment. 2009. Työkalut ja mittarointi vesilaitosten ilmastomyönteiseen toiminnan kehittämiseen. Raportti 67090263
- Riiko, K. & Yli-Renko, M. 2011. TEHO-hankkeen raportteja, osa 2. TEHO-hankkeen julkaisuja 3/2011. [https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/hankkeet/foodprint/laskentasuositus/LIITE 2 Kaa- vakokoelma 7.11.2012.pdf](https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/hankkeet/foodprint/laskentasuositus/LIITE%20Kaa- vakokoelma%207.11.2012.pdf)
- Saarinen M., Kurppa S., Nissinen A. ja Mäkelä J. (toimittajat) 2011. Aterioiden ja asumisen valinnat kulutuksen ympäristövaikutusten ytimessä ConsEnv -hankkeen loppuraportti. SUOMEN YMPÄRISTÖ 14, ISBN 978-952-11-3897-3 (PDF), ISSN 1796-1637 (verkkopublication).
- Saarinen M., Sinkko T., Joensuu K., Silvenius F. ja Ratilainen A. 2014. Ravitsemus ja maaperävaikutukset ruoan elinkaariarvioinnissa SustFoodChoice-hankkeen loppuraportti. <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti146.pdf>
- Saikka L., Antikainen, R., & Kauppi, P.E. 2007. Nitrogen and phosphorus in the Finnish energy system, 1900–2003. *Journal of Industrial Ecology* 11 (1): 103–119.
- Schröder, J.J., Cordell, D., Smit, A.L. and Rosemarin, R. 2010. Sustainable Use of Phosphorous. Report No. 357. Plant Research International, Wageningen University and Research Centre, the Netherlands, and Stockholm Environment Institute
- Smil V. 2000. Phosphorus in the Environment: Natural Flows and Human Interferences. *Annual Review of Energy and the Environment* 25: 53-88.
- Smit A.L.; Bindraban P.; Schröder J.J.; Conijn J.G. & H.G.v.d. Meer 2009. Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. *Plant Research International (Report 282)*: 36 pp.
- Steen I. 1998. Phosphorus availability in the 21st Century: Management of a non-renewable resource. *Phosphorus and Potassium* 217: 25-21.
- Sutton M.A., Bleeker C. M., et al. 2013. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. *Global Overview of Nutrient Management*. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative. Saatavilla: <http://initrogen.org/index.php/publications/our-nutrient-world/>
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto. ISSN=1798-3339. 2011, Liitetäulukko 1. Yhdyskuntajätteet vuonna 2011, tonnia. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu: 6.9.2013]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/jate/2011/jate_2011_2012-11-20_tau_001_fi.html

- Suomen virallinen tilasto (SVT): Tieliikenteen tavarankuljetukset. ISSN=1798-2995. 2012, Liitetaulukko 10. Keskimääräinen kuljetusmatka ja kuormausaste kotimaan liikenteessä tavaralajeittain vuonna 2012 . Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu: 12.8.2013]. Saatavilla: http://tilastokeskus.fi/til/kttav/2012/kttav_2012_2013-05-08_tau_010_fi.html
- Säylä J. & Vilpas R. 2012. Yhdyskuntien jätevesien puhdistus 2010. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 21/2012.
- Tchobanoglous G., Theisen H. & Vigil S. 1993. Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues. McGraw-Hill, Inc.
<http://initrogen.org/index.php/publications/our-nutrient-world/>
- Teirasvuo N. 2011. Syntypaikkalajitellun sekajätteen koostumuksen sekä palamisteknisten ominaisuuksien selvitys Etelä-Karjalan alueella. Diplomityö, LUT.
- Tukiainen T. 2009. Vesihuoltolaitosten kasvihuonekaasupäästöt Suomessa. Diplomityö, TKK.
- Vesilaitosyhdistys. 2013a. Jätevedet. [Viitattu: 23.9.2013]. Saatavilla: http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet
- Vesilaitosyhdistys. 2013b. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. ISBN 978-952-6697-91-8
- Virtanen Y. 2014. LUKE, 6.2.2014 Suullinen tiedonanto.
- Vuorenmaa J., Arvola L. & Rask M. 2011. Hämeen ympäristö muutoksissa. Suomen ympäristö 34 / 2011.
- Wilhelms ja Tanner-Faarinen. 2013. Energiavuosi 2012, Kaukolämpö. Energiateollisuus. [Viitattu 1.2.2014.] Saatavilla: <http://www.slideshare.net/energiateollisuus/kl-kalvopakettitilastot-2012>
- VVY. 2011. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla syntyvän lietteen käsittely vuosina 1998–2011.[viitattu: 21.1.2014]. Saatavilla: http://www.vvy.fi/files/3053/YKliete1998_2010fin.pdf
- Ympäristötilasto. 2013. Vuosikirja 2013. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 24.10.2013]. Saatavilla: http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/ymparistotilasto2013/html/suom0001.htm



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Viikinkaari 4
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000