

PELTOENERGIAN TUOTANTOJÄRJESTELMIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Yrjö Virtanen, Kirsi Usva, Frans Silvenius, Taija Sinkko, Pauliina Nurmi,
Tommi Kauppinen, Jouni Nousiainen

PELTOENERGIAN TUOTANTOJÄRJESTELMIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Yrjö Virtanen, Kirsi Usva, Frans Silvenius, Taija Sinkko, Pauliina Nurmi,
Tommi Kauppinen, Jouni Nousiainen

MTT (Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus), Biotekniikka- ja
elintarviketutkimus, Elintarvike-ekologia, etunimi.sukunimi@mtt.fi

Tiivistelmä

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli suomalaisten peltobioenergiaketjujen ympäristövaikutusten ja ympäristökuormitusten arviointi. Ympäristövaikutusten arviointi on tehty elinkaariarviointimenetelmällä (Life-cycle Assessment, LCA). Tarkasteltavat järjestelmät on valittu pääasiassa Suomessa toteutuneiden ja toteutussuunnitteluvaiheeseen edenneiden peltobioenergiaprojektien joukosta. Tarkasteltaviksi järjestelmiksi on täten valikoitunut bioetanolin tuotanto, biodieselin tuotanto maatilakokoluokassa ja NExBTL-prosessilla, sekä ruokohelpin, viljan oljen ja rypsin ja rapsin korren käyttö kattilalaitosten polttoaineena. Biopolttoaineketjujen kuluttama sähkö, lämpöenergia ja moottoripolttoaineet on huomioitu nykytilanteen mukaisesti, eli sähkö hankittuna Suomen sähkönhankinnan mukaisesti, lämpö tuotettuna toimijoiden nykyisillä teknologioilla ja polttoaineilla, ja moottoripolttoaineina maaöljylähtöiset polttoaineet. Kiinteiden biopolttoaineiden vertailujärjestelmiksi on valittu turve ja metsätähdehake, ja nestemäisten biopolttoaineiden vertailujärjestelmiksi maaöljypohjainen diesel ja bensiini.

Tutkimuksessa on tarkasteltu polttoaineketjujen primäärienergian kulutusta, ilmastonmuutosvaikutusta, vesistöjen rehevöitymisvaikutusta, happamoitumisvaikutusta ja alailmakehän otsonin muodostumisvaikutusta. Liikennepolttoainejärjestelmien (bioetanoli ja biodiesel) toiminnallisena yksikkönä on käytetty 1 MJ polttoaineen alemmaa lämpöarvoa. Käyttövaiheen mukaan ottamiseen elinkaarimalliin ei saatu riittäviä tietoja, mutta käytön päästöjä on kuitenkin tarkasteltu erikseen muiden tutkimusten tulosten valossa. Kiinteiden biopolttoainejärjestelmien (ruokohelpi, olki ja korret) toiminnallinen yksikkö on 1 MJ lämpöenergiaa. Kiinteiden polttoaineiden käyttövaiheen päästöt on otettu mukaan tutkimukseen.

Tulokset osoittavat, että sivutuotteina syntyvien peltobiopolttoaineiden, viljan oljen ja rypsin korren ympäristövaikutukset ovat varsin pienet verrattuna turpeeseen tai fossiilisiin polttoaineisiin. Primääriset peltobiopolttoaineet, bioetanoli, biodiesel ja ruokohelpi taas eivät ole ympäristövaikutuksiltaan selkeästi fossiilisia polttoaineita tai turvetta parempia. Kotimaisista primääriraaka-aineista valmistettu bioetanoli ja biodiesel eivät nykyisillä menetelmillä tuotettuina olisi ympäristövaikutuksiltaan olennaisesti fossiilisia polttonesteitä parempia, koska matkalla panoksista käyttövalmiiksi polttoaineeksi kertyy biopolttoaineketjuissa ympäristövaikutuksia paljon enemmän kuin fossiilisten polttoaineiden ketjuissa. Eniten ympäristövaikutuksien kertymää kasvattaa kasvintuotanto. Primäärienergian kulutukseen vaikuttavat myös ketjujen jalostusprosessit ja panostuotanto.

Nestemäisten polttoaineiden vertailun perusteella voidaan sanoa, että käyttövalmiiden biopolttonesteiden happamoitusvaikutus ja alailmakehän otsonin muodostumisvaikutus on noin 5-10 -kertainen, ilmastonmuutosvaikutus noin kaksikymmentäkertainen, ja vesistöjen rehevöitymisvaikutus monisatakertainen fossiilisen dieselin vastaaviin vaikutuksiin verrattuna, kun vertailussa otetaan huomioon vain valmistusketjun aiheuttamat päästöt. Fossiilista primäärienergiaa kuluu lämpöarvoon suhteutettuna biopolttonesteiden valmistuksessa vastaavasti 5-10 -kertainen määrä maaöljypohjaisen dieselin valmistamiseen verrattuna. Kun otetaan valmistuksen ympäristökuormitusten lisäksi huomioon polttoaineiden käytössä syntyvät päästöt, ovat ympäristövaikutusten suhteet biopolttonesteille myönteisempiä. Biopolttonesteiden ympäristövaikutukset eivät tällöinkään ole olennaisesti maaöljydieseliä tai bensiiniä pienempiä.

Bioetanolin ja biodieselin ympäristövaikutusarvioinnin tulokset riippuvat voimakkaasti sivutuotevirtojen käytöstä ja käytön hyvityksistä. Jos bioetanolin valmistuksessa syntyvä rankki hyödynnetään biokaasuna, pienenevät kasviuonekaasupäästöt, happamoittavat päästöt ja alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt verrattuna siihen, että prosessissa käytetään fossiilisia polttoaineita. Ympäristövaikutukset olisivat tässäkin tapauksessa, alailmakehän otsonin muodostumisvaikutusta lukuun ottamatta, kuitenkin suuremmat kuin fossiilisella bensiinillä tai dieselillä.

Kiinteillä peltobiopolttoaineilla tuotetun energian ympäristövaikutusten suhde turpeella ja metsätähdehakeella tuotetun energian ympäristövaikutuksiin vaihtelee ympäristövaikutusluokittain ja polttoaineittain. Ilmastonmuutosvaikutuksessa sekä ruokohelpi että viljan olki ja rypsin korsi olisivat turvetta parempia vaihtoehtoja. Metsätähdehakeeseen nähden olki ja korsi olisivat likimain samanveroisia, mutta ruokohelpi selvästi suurempi kuormittaja. Vesistöjen rehevöitymisvaikutuksissa ruokohelpi olisi omassa luokassaan, moninkertaisesti muita suuremmin vaikutuksin. Happamoitusvaikutuksessa sekä turve että metsätähdehake olisivat vähemmän kuormittavia kuin ruokohelpi tai olki ja korsi. Alailmakehän otsonin muodostumisvaikutuksessa peltobiopolttoaineet olisivat jonkin verran turvetta ja metsätähdehakeetta parempia vaihtoehtoja. Uusiutumattoman primäärienergian kulutus olisi peltobiopolttoaineilla suurempi kuin turpeella tai metsähakeella, ja ruokohelpillä selvästi suurempi kuin muilla polttoaineilla.

Primääristen peltobiopolttoaineiden ketjuista olisi etsittävä kohteita, joissa ympäristövaikutuksia voitaisiin pienentää, jotta liikenteen ja energiantuotannon ympäristövaikutukset todella vähentyisivät peltobiopolttoaineiden käyttöä lisääessä. Primääristen peltobioenergiaketjujen ympäristökuormituksista suurin osa syntyy kasvintuotannosta. Esimerkiksi bioetanoliketjun ilmastonmuutosvaikutuksesta noin 50 % aiheutuu suoraan kasvintuotannosta ja noin 25 % kasvintuotannon panosten tuotannosta. Vesistöjen rehevöitymisvaikutuksesta yli 90 % tulee kasvintuotannosta ja loppu kasvintuotannon panosten tuotannosta. Hyödyllisintä olisikin keskittää ympäristövaikutusten pienentämistoimenpiteet juuri kasvintuotantoon. Satotasojen nousu vähentäisi tehokkaasti kaikkia ominaiskuormituksia (kuormitus suhteessa polttoaineen energiaan), ja jos se toteutettaisiin viljelyn panoksia liikaa lisäämättä, voisivat peltobiopolttoaineiden ominaiskuormitukset laskea tuntuvasti nykyisistä. Ilmastonmuutosvaikutuksen kannalta keskeistä olisi typpilannoituksen optimoiminen (typpiravinteiden ominaiskäytön minimoiminen), jolla vähentyisivät sekä suorat että

ammoniakin ja huuhtoumien kautta syntyvät epäsuorat dityppioksidin päästöt. Myös karbonaattivapaiden neutralointiaineiden käytön lisääminen ja työkoneiden käytön vähentäminen pienentäisivät ilmastomuutosvaikutusta. Ravinnehuuhtoumien vähentäminen tapahtuisi myös satotasojen nostolla ja ravinnetaseiden optimoinnilla sekä eroosiota vähentävillä viljelytekniikoilla ja huuhtoumia vähentävillä suojavyöhykkeillä.

Avainsanat

ympäristövaikutus, LCA, peltobioenergia, biodiesel, bioetanoli, ruokohelpi, olki

ALKUSANAT

Peltobioenergian tuotantojärjestelmät oli Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT) tutkimusprojekti, jonka rahoittajana oli Maa- ja metsätalousministeriö. Tutkimuksen toteutti MTT:n tutkijaryhmä vastuullisena johtajanaan vanhempi tutkija Yrjö Virtanen. MTT:n tutkimusryhmään kuuluivat lisäksi tutkijat Kirsi Usva, Frans Silvenius, Taija Sinkko, Pauliina Nurmi ja Tommi Kauppinen sekä eläinravitsemuksen asiantuntijana Jouni Nousiainen.

Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat ylitarkastaja Veli-Pekka Reskola, Maa- ja metsätalousministeriöstä (ohjausryhmän puheenjohtaja), Ilpo Mattila, Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitosta (MTK), Simo Kyllönen, Suomen luonnonsuojeluliitosta (SLL) ja Marko Nokkala, Valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta (VTT).

Bioetanolin tuotannosta antoivat arvokkaita tietoja Aate Laukkanen Suomen Bioetanol Oy:stä, Harri Enwald Valcon Oy:stä, Niklas von Weymar, Tuula Mäkinen ja Sampo Soimakallio VTT:ltä, Maritta Kymäläinen Hämeenlinnan ammattikorkeakoulusta, Henriikki Liimatainen ja Toivo Kuokkanen Oulun yliopistosta, Erkki Lepistö Mildola Oy:stä ja Antti Pasanen ST1:stä. Bioetanolin tuotoon liittyvät biokaasun päästökertoimet saatiin Ari Ylisirniöltä Envor Bioetch Oy:stä.

Rehujakeiden käyttöä koskeviin kysymyksiin antoivat arvokasta taustatietoa Marketta Rinne, Jarmo Valaja ja Arto Huuskonen MTT:stä.

Maatilakokoluokan biodieseltuotannon tutkimuksessa suurin kiitos kuuluu biodieseltuottajille, jotka avustivat tietojen saannissa biodiesel-tuotannosta. Riitta Lempiäinen Neste Oil Oyj:stä antoi lisätietoja NExBTL:n valmistuksesta. Raisio Yhtymästä Pekka Heikkinen ja Henry Sundström antoivat tietoja rypsiöljyn valmistuksesta.

Ruokohelpin tuotannon tietojen keräämisessä suurena apuna olivat Mia Suominen Suo Oy:stä, kaikki ruokohelpin peltoviljelykyselyyn osallistuneet tuottajat sekä turvetuotanto alueiden ruokohelpituotannosta tietoja toimittaneet Tapani Mikkonen ja Marjukka Kautto sekä muut tutkimukseen osallistuneet.

Kiitokset kaikille tutkimusta avustaneille.

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	7
2. HANKKEEN TAVOITE, MENETELMÄ JA RAJAUS	9
2.1. Tavoite	9
2.2. Menetelmä.....	9
2.3. Rajaukset.....	10
2.3.1. Tarkasteltavat järjestelmät.....	10
2.3.2. Ympäristövaikutusluokat.....	10
2.3.3. Järjestelmien toiminnalliset yksiköt ja yleiset rajaukset	11
2.3.4. Bioetanoli	11
2.3.5. Biodiesel.....	12
2.3.6. Ruokohelppi, olki ja korsu	14
3. RAAKA-AINEIDEN JA POLTTOAINEIDEN TUOTANTO	15
3.1. Bioetanoli	15
3.1.1. Vehnän ja ohran tuotanto ja saatavuus.....	15
3.1.2. Perunan ja sokerijuurikkaan tuotanto ja saatavuus	17
3.1.3. Bioetanolin tuotanto	19
3.2. Biodiesel.....	24
3.2.1. Rypsin tuotanto ja saatavuus	24
3.2.2. Biodieselin tuotanto	25
3.3. Kiinteät polttoaineet.....	28
3.3.1. Ruokohelppi	28
3.3.2. Viljan olki sekä rypsin ja rapsin korsu.....	31
4. YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN INVENTOINTI.....	36
4.1. Tietolähteet.....	36
4.1.1. Viljely.....	36
4.1.2. Polttoaineen tuotanto.....	39
4.1.3. Kuljetukset.....	41
4.1.4. Polttoaineen käyttö.....	43
4.2. Vertailuketjut.....	47
4.3. Allokoinnit ja hyvitykset.....	49
5. INVENTAARIOTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	50
5.1. Nestemäiset biopolttoaineet	50
5.1.1. Bioetanoli	50
5.1.2. Biodiesel.....	59
5.1.3. Nestemäisten polttoaineiden vertailu.....	65
5.2. Kiinteät biopolttoaineet.....	69
5.2.1. Ruokohelppi	69
5.2.2. Viljan olki sekä rypsin ja rapsin korsu.....	73
5.2.3. Kiinteiden polttoaineiden vertailu	76
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	78
6.1. Nestemäiset biopolttoaineet	78
6.2. Kiinteät biopolttoaineet.....	81
7. KETJUN PARANNUSMAHDOLLISUUKSIEN ARVIOINTI	82
8. LÄHTEET.....	84

1. JOHDANTO

Tällä tutkimushankkeella oli alun perin tarkoitus arvioida ja vertailla kotimaisesta rypsiä valmistetun biodieselin (RME) elinkaaren ympäristövaikutuksia eräissä hajautetun pientuotannon toteutusmalleissa, koska maaseudulla oli virinnyt suuri kiinnostus omaan biodieselin valmistukseen julkisen bioenergiakeskustelun lietsomana. Viljelijät ja karjatilalliset näkivät biodieselin antamat uudet mahdollisuudet hyvinvointinsa kehittämiseen oman rypsin vaihtoehtoisen hyödyntämisen, oman valkuaisrehuraaka-aineen tuotannon ja oman moottoripolttoaineen tuotannon avulla. Hajautetun biodieseltuotannon ympäristökuormituksista ei kuitenkaan ollut olemassa Suomen olosuhteisiin soveltuvia arvioita.

Suomalaisten tuotantoketjujen tuottamasta peltobioenergiasta ei ollut muutenkaan tehty ympäristövaikutusten arvioita, joten biodieselin hajautettu tuotanto ei ollut tässä suhteessa poikkeus. Laajempi peltobioenergiaketjujen ympäristövaikutusten arviointi nähtiin ensiarvoisen tärkeäksi, ja sen perusteella tämän tutkimushankkeen kohde laajennettiin käsittämään kaikki potentiaaliset suomalaiset peltobioenergiaketjut ja niille ominaiset ympäristökuormitukset (elinkaaren ympäristökuormitukset suhteessa tuotetun polttoaineen alempaan lämpöarvoon). Tämän tutkimuksen rinnalla tehtiin peltoenergian alue- ja maatilataloudellisia kysymyksiä selvittävää tutkimusta MTT Taloustutkimuksen hankkeessa ”Maatalouden bioenergia maaseudulla - ympäristö- ja aluetaloudelliset vaikutukset sekä tukitoimien kohdentaminen (BIOAGRE)” (Vihma ym., 2006) sekä PTT:n ja Joensuun yliopiston hankkeessa ”Bioenergian tuotanto maatilojen ja maaseudun elinkeinona - tarjonta - yrittäjyys - kannattavuus – liiketoimintamallit (BIOTILA)” (Latvala ym., 2008). Näiden rinnakaistutkimusten lisäksi peltoenergian mahdollisia sosioekonomisia vaikutuksia on arvioitu viime vuosina monissa muissa tutkimuksissa ja selvityksissä.

Hankkeen kestäessä valmistui eräiden peltobioenergiaketjujen ympäristövaikutuksista ja kannattavuudesta kotimaisia tutkimuksia (esim. Mäkinen ym., 2006), joiden käsittelyt ja tulokset antoivat aiheen lisäkohdistaa tutkimusta. Tässä tutkimuksessa arvioitaville peltobioenergiajärjestelmille on yhteistä se, että ne perustuvat jo toteutettuihin tai suunnitteluvaiheessa toteutuskelpoisiksi arvioituihin järjestelmäratkaisuihin. Yhteistä on myös bioraaka-aineiden energiapotentiaalin maksimaalisen energiahyödyntämisen periaate. Vertailun vuoksi arvioidaan myös muihin biomateriaalien hyödyntämistapoihin, kuten rehukäyttöön, perustuvia ratkaisuja muiden kotimaisten tutkimusten tapaan. Arvioinneissa käytetään elinkaariarviointimenetelmää. Tässä tutkimuksessa biopolttoaineille saatuja kuormitustuloksia verrataan muissa biopolttoainetutkimuksissa saatuihin tuloksiin sekä fossiilisten polttoaineiden (ja turpeen) arvioinneista muualla saatuihin tuloksiin.

Tutkimukset esimerkiksi bioetanolin tuotannon ympäristövaikutuksista vaihtelevat tuloksiltaan. Suomessa on tehty tutkimus, jossa on laskettu energia- ja kasvihuonekaasutaseet ohrasta tuotetulle bioetanolille (Mäkinen ym., 2006). Muita ympäristövaikutuksia ei kyseiseen tutkimukseen ollut sisällytetty. Tässä tutkimuksessa otetaan huomioon myös happamoituminen, alailmakehän otsonin muodostuminen ja vesien rehevöityminen. Mäkisen ym. (2006) tutkimuksen mukaan bioetanolin kasvihuonekaasutase voi olla jopa suurempi kuin fossiililla polttoaineilla, kun bioetanolia tuotetaan käyttäen ohraa raaka-aineena.

Samansuuntaisia tuloksia esittävät myös Pimentel (2003) ja Reijnders & Huijbregts (2006). Toisaalta eräät tutkimukset, kuten Edwards ym. (2006) ja ruotsalaiseen bioetanolin tuotantoon perustuva tutkimus (Bernesson ym., 2006) antavat aivan erilaisen kuvan bioetanolin tuotannon kestävyydestä kasviuonekaasutaseesta.

Enwald (2007) mainitsee yhdeksän erilaista etanolin tuotantokonseptia Euroopassa, jotka vähentävät selvästi kasviuonekaasupäästöjä. Kuitenkin muiden ympäristönäkökohtien huomioon ottaminen muuttaa tilannetta. Bernessonin (2004) taustaraportin mukaan bioetanolin elinkaaren aikaiset kasviuonekaasupäästöt ovat 52-53 % pienemmät, happamoittavat päästöt 4-5 % suuremmat ja POCP-päästöt 37-48 % suuremmat kuin fossiilisen dieselin. Tutkimuksessa bioetanolin raaka-aineena oli vehnä, jonka satotaso on Ruotsissa huomattavasti suurempi kuin Suomessa. Kyseisten tutkimusten mukaan bioetanolin tuotanto saattaa olla ympäristönäkökohdat huomioon ottaen kannattavaa. Tuloksiin vaikuttavat voimakkaasti allokointimenetelmät, joten onkin vaikea esittää yksikäsitteistä arviota bioetanolin tuotannon ympäristökannattavuudesta. Edwards ym. (2006) ovat esittäneet myös sokeriruoko- ja olkipohjaiselle etanolille hyvin edullisia energia- ja kasviuonekaasutaseita. Olkipohjaisen bioetanolin tuotanto on arvioitu toistaiseksi taloudellisesti kannattamattomaksi (von Weymar, 2007), mutta tekniikan kehittyessä tilanne voi muuttua.

Maailmalla bioetanolia tuotetaan monissa maissa. Verrattuna maaöljylähtöisiin polttoaineisiin, tuotanto on kuitenkin pientä. Ruotsissa toimii Norrköpingin vehnä raaka-aineena käyttävä laitos, jonka kapasiteetti on 210 miljoonaa litraa bioetanolia vuodessa (www.agroetanol.se). USA:ssa bioetanolin tuotanto oli 34 000 miljoonaa litraa vuodessa ja Brasiliassa 27 000 miljoonaa litraa vuodessa vuonna 2008 (Ren 21., 2009). Brasiliassa raaka-aineena on pääasiassa sokeriruoko ja USA:ssa maissi. EU:n keskimääräiseksi etanolin tuotantokapasiteetiksi on arvioitu 63 000 litraa vuodessa (Vesanto ym., 2007).

Bioetanolin tuotantosuunnitelmia on Suomessa Suomen Bioetanolin Oy:llä Punkaharjulla ja Hämeen ammattikorkeakoulun johtamalla projektiryhmällä Hämeessä. Lisäksi Tyrnäväällä Shaman's Spirit Oy:llä on suunnitelma tuotannon laajentamisesta alkoholijuomista liikennepolttoaineiden tuotantoon. Raaka-aineena Punkaharjulla on ohra, Shaman's Spiritillä peruna ja Hämeessä laskelmat on tehty sekä ohralle että 40 % sokerijuurikkaasta ja 60 % ohraa käyttävälle laitokselle.

Bioetanolinlaitosten kannattavuus riippuu paljon raaka-aineiden hinnasta. Bioetanolin tuotanto lisää viljan kysyntää, jonka seurauksena viljan hinta nousee. Tämä lisää maataloustuotannon kannattavuutta, mutta bioetanolin tuotannosta tulee kannattamatonta korkeiden raaka-ainekustannusten vuoksi. Muutamista hankkeista, kuten Lännen Tehtailla Säkylässä, Sucros Oy:llä Salossa ja Altialla Ilmajoella, onkin jouduttu luopumaan viljan hinnan noustessa. Näin ollen laajamittainen bioetanolin tuotannon käynnistyminen ja jatkuminen Suomessa saattaisi ajoittain vaatia yhteiskunnan tukea. Viime aikoina viljan hinta on tosin ollut taas laskussa. Erilaisista jäte- ja sivuvirtaraaka-aineista tehtyjen polttoaineiden tuotantokustannukset ovat selvästi pienemmät. Tällaisia laitoksia on Suomessa toiminnassa ST1:llä, joka käyttää raaka-aineenaan elintarviketähteiden sivuvirtoja. Lisäksi Lassila & Tikanojalla on suunnitteilla paperijätettä hyödyntävä laitos, jonka kapasiteetti olisi 20 000 m³ (Hietanen, 2009).

Kiinteistä biopolttoaineista mukaan tarkasteluihin valittiin ruokohelppi, olki ja korsi. Ruokohelppin viljely energiakäyttöön on viime vuosina lisääntynyt Suomessa ja sen viljelypinta-alaa on tarkoitus edelleen lisätä. Ruokohelppi biomassakasvina on käyttökelpoinen, koska sillä on suhteellisesti runsas sato, ja ruokohelpistä saadaan satoa noin kymmenen vuotta (Pahkala ym., 2005). Viljan sekä rypsin ja rapsin viljelyn sivutuotteena syntyvien olkien ja korsien hyötykäyttö on Suomessa rajoittunut eläinten kuivike- ja rehukäyttöön, johon käytetään noin 20 % syntyvästä oljesta. Loppu olki- ja korsimäärä kynnetään yleensä peltoon parantamaan pellon laatua ja humuspitoisuutta. Suorakylvön yleistymisen johtaa kuitenkin siihen, että oljet pitäisi saada korjattua pois pelloilta kylvön tieltä. Tanskassa olkien hyödyntäminen on ollut jo pitkään runsasta maatilakokoluokan kattiloista aina CHP-laitoksiin asti (The Centre of Biomass Technology, 1998). Myös Suomessa on saatavilla tanskalaisia maatilakokoluokan kattiloita, ja suurempienkin sovellusten käyttöönottoaminen voisi olla mahdollista pitkällä aikavälillä. Olkien ja korsien laajamittaisen hyödyntämisen riskinä on kuitenkin maan hiilivarastojen hupeneminen ja maan köyhtyminen, jonka seurauksena lannoitusta olisi lisättävä.

2. HANKKEEN TAVOITE, MENETELMÄ JA RAJAUS

2.1. Tavoite

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena on tuottaa arviot jo toteutettujen tai suunnitteluvaiheessa toteutuskelpoisiksi arvioitujen, suomalaisiin raaka-aineisiin perustuvien peltobioenergiajärjestelmien ympäristökuormituksista ja näistä aiheutuvista ympäristövaikutuksista sekä vertailla järjestelmiä, ja niiden eräitä variaatioita, arviointitulosten perusteella. Järjestelmävarioinnilla on etsitty ekologisesti hyvin toimivia ja tehokkaita kokonaisratkaisuja, johtoajatukseksi pelloilta saatavien bioraaka-aineiden tarkka käyttö, ja mahdollisimman vähäinen uusiutumattoman energian tarve.

Tuloksia verrataan muissa biopolttoainetutkimuksissa saatuihin tuloksiin sekä fossiilisten polttoaineiden (ja turpeen) järjestelmistä muissa arvioinneissa saatuihin tuloksiin. Peltobiopolttoaineiden käytön ilmapäästöjä tarkastellaan kvalitatiivisesti kirjallisuuteen perustuen.

2.2. Menetelmä

Ympäristövaikutusten arviointi on tehty elinkaariarviointimenetelmällä (Life-cycle Assessment, LCA). Elinkaariarvioinnissa on noudatettu siitä annettuja standardeja ISO 14040 ja ISO 14044. Niiden mukaisesti elinkaariarvioinnin päävaiheet ovat 1) tavoitteen asettelu ja rajaukset, 2) kuormitusten inventointi eli inventaarioanalyysi, 3) ympäristövaikutusten arviointi ja 4) tulosten tulkinta. Ympäristövaikutusarvioinnin tuloksia saatetaan normalisoida ja arvottaa tai muuten jatkokäsitellä. Tähän tutkimukseen jatkovaiheita ei kuitenkaan ole otettu mukaan.

Elinkaariarviointimenetelmällä määritetään tuotteen elinkaaren eri vaiheissa syntyvät erityyppiset ympäristövaikutukset valittua toiminnallista yksikköä kohden. Toiminnallinen yksikkö on tuotteella tuotettu aineellinen tai aineeton palvelu.

Menetelmällä voidaan esimerkiksi tarkastella ympäristövaikutusten eroja eri tuotantotapojen välillä. Elinkaariarviointi soveltuu hyvin bioenergiatuotteiden vertailuun, joiden ympäristövaikutuksien kertyminen riippuu tuotantoketjun kokoonpanosta ja vaihtelee varsin paljon ketjujen kesken.

Elinkaariarvioinnin tärkein vaihe on ympäristökuormitusten inventointi, jossa tuotantoketjun ja käyttövaiheen panokset ja tuotokset inventoidaan prosessi prosessilta. Inventaarioanalyysi perustuu tässä tutkimuksessa olennaisilta osin todellisten prosessien ja toteutussuunnitteluvaiheeseen edenneiden biopolttoainehankkeiden prosessitietoihin. Ympäristökuormitusinventaarion tietolähteet ja tiedonhankintamenetelmät on kuvattu luvussa 4. Inventaarion tuloksiin perustuen on tehty ympäristövaikutusten arviointi, jossa on laskettu kuormitusten aiheuttamat ympäristövaikutukset ympäristövaikutusluokittain. Ympäristövaikutusten laskennassa käytetyt karakterisointikertoimet on kuvattu liitteessä 1.

2.3. Rajaukset

2.3.1. Tarkasteltavat järjestelmät

Tarkasteltavat järjestelmät on valittu pääasiassa Suomessa toteutuneiden ja toteutussuunnitteluvaiheeseen edenneiden peltobioenergiainhankkeiden joukosta. Tarkasteltaviksi järjestelmiksi on täten valikoitunut bioetanolin tuotanto, biodieselin tuotanto maatilakokoluokassa ja NExBTL-prosessilla, sekä ruokohelpin, viljan oljen ja rypsin ja rapsin korren käyttö kattilalaitosten polttoaineena. Biopolttoaineketjujen kuluttama sähkö, lämpöenergia ja moottoripolttoaineet on huomioitu nykytilanteen mukaisesti, eli sähkö hankittuna Suomen sähkönhankinnan mukaisesti, lämpö tuotettuna toimijoiden nykyisillä teknologioilla ja polttoaineilla, ja moottoripolttoaineina maaöljylähtöiset polttoaineet. Vertailujärjestelmiksi on valittu kiinteiden polttoaineiden osalta turve ja metsätähdehake, ja nestemäisten polttoaineiden osalta maaöljypohjainen diesel ja bensiini.

2.3.2. Ympäristövaikutusluokat

Ympäristökuormitusten arviot pitävät sisällään uusiutumattoman ja uusiutuvan primäärienergian kulutuksen sekä vaikutuksen ilmastonmuutokseen, happamoitumiseen, alailmakehän otsonin muodostumiseen ja vesien rehevöitymiseen, kunkin tutkimuskohteena olevan peltobioenergiatyyppin elinkaaren eri vaiheissa. Peltobioenergian tuotannolla on myös muita ympäristövaikutuksia, kuten muutokset maankäytössä, ekotoksikologiset vaikutukset ja vaikutukset biodiversiteettiin. Näiden vaikutusten arviointimenetelmät ovat kuitenkin vielä kehitysasteella, joten ne on jätetty tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Muun muassa torjunta-aineiden käyttö, joka on peltobioenergiajärjestelmissä tärkeä aspekti, ei sisälly kvantitatiivisiin arvioihin puutteellisten käyttötietojen ja karakterisointimenetelmien vielä hyvin varhaisen kehitysasteen vuoksi.

Tässä tutkimuksessa on mukana viisi ympäristövaikutusluokkaa, jotka ovat: primäärienergian kulutus, ilmastonmuutos, rehevöityminen, happamoituminen ja alailmakehän otsonin muodostus.

2.3.3. Järjestelmien toiminnalliset yksiköt ja yleiset rajaukset

Liikennepolttoainejärjestelmien (bioetanoli ja biodiesel) toiminnallisena yksikkönä on käytetty 1 MJ polttoaineen alemmaa lämpöarvoa. Käyttövaiheen mukaan ottamiseen elinkaarimalliin ei saatu riittäviä tietoja, mutta käytön päästöjä on kuitenkin tarkasteltu erikseen muiden tutkimusten tulosten valossa. Kiinteiden biopolttoainejärjestelmien (ruokohelpi, olki ja korret) toiminnallinen yksikkö on 1 MJ lämpöenergiaa. Kiinteiden polttoaineiden käyttövaiheen päästöt on otettu mukaan tutkimukseen.

Järjestelmät on rajattu seuraavin yleisin periaatein:

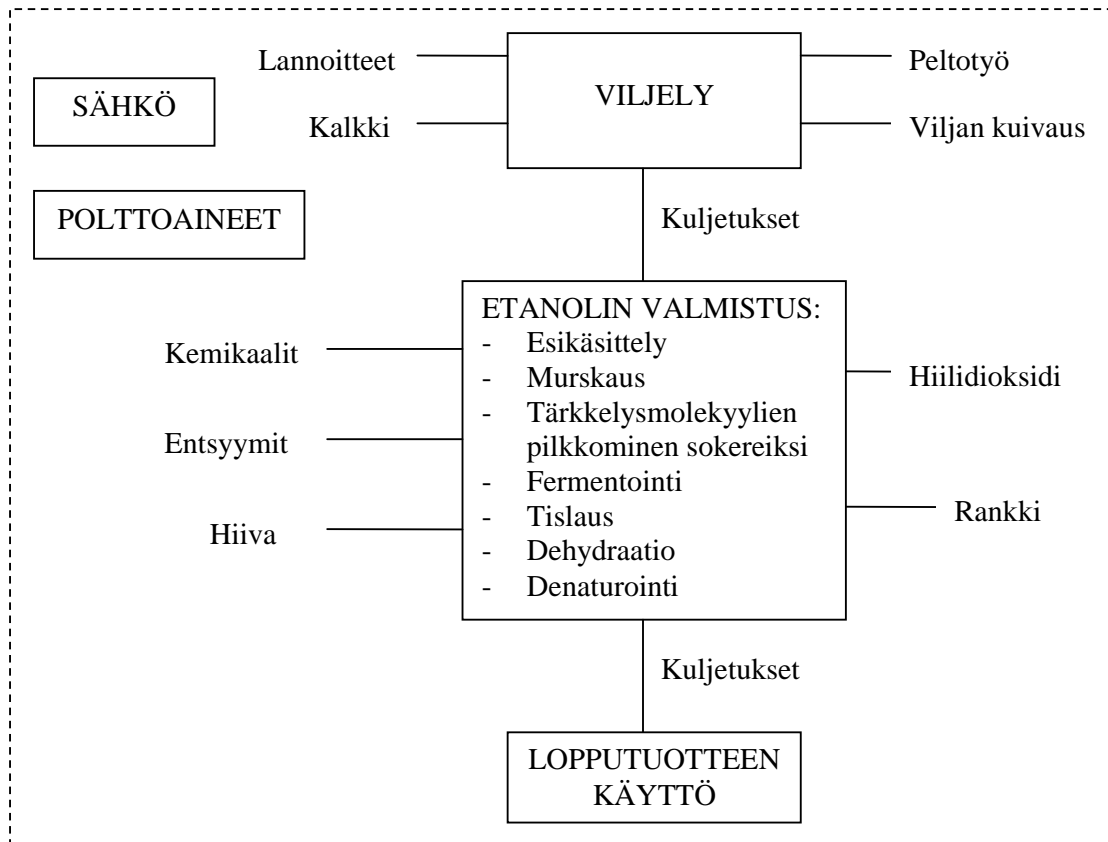
1) Ylävirrassa rajat ovat luonnon raaka-ainelähteissä. Hyvin pienten panosvirtojen ketjut, esimerkiksi kasvinsuojeluaineet, on karsittu pois ja järjestelmän raja on ao. panosvirran sisääntulossa järjestelmään.

2) Alavirrassa rajat ovat päästövirtojen tapauksessa luonnossa. Sivuvirtojen kohdalla raja on uloslähdössä systeemistä. Rinnakkaisvirrat ja niihin liittyvät panokset ja tuotokset on erotettu tarkasteltavasta järjestelmästä allokontimenettelyllä. Sivuvirtojen hyötykäytön hyvityksiä tarkastellaan erikseen. Sivuvirroiksi määritellään sellaiset tutkittavan järjestelmän tuotokset, joita ei käytetä tutkittavassa järjestelmässä ja jotka eivät ole minkään ulkopuolisen prosessin ensisijaisia raaka-aineita. Rinnakkaisvirroiksi määritellään muuten sivuvirtoja vastaavat virrat, paitsi siltä osin, jos ne ovat jonkin ulkopuolisen prosessin ensisijaisia raaka-aineita.

2.3.4. Bioetanoli

Bioetanolin tuotannon systeemiin (kuva 1) kuuluu panostuotanto (lannoitteiden ja kalkin tuotanto, siementuotanto), viljely, kuljetukset, bioetanolin valmistusprosessi ja käyttö ajoneuvoissa. Käyttövaihe ei kuitenkaan ole mukana elinkaarimallissa, vaan sitä tarkastellaan erikseen muiden tutkimusten tulosten perusteella.

Bioetanolin valmistusprosessiin kuuluu puhdistus, biomassan murskaus, tärkkelysmolekyylien pilkkominen sokereiksi, fermentointi, tislaukset ja dehydraatio. Erityisesti tislauksevaiheessa tarvitaan paljon sähkö- ja lämpöenergiaa. Valmistukseen tarvitaan myös jonkin verran kemikaaleja sekä entsyymejä ja hiivaa, jonka lisäksi kemikaaleja tarvitaan etanolin denaturointiin. Bioetanolin valmistuksen sivutuotteena syntyy hiilidioksidia ja rankkia, jota voidaan käyttää joko rehuna tai polttoaineena. Bioetanolin tuotantoa tarkastellaan perustapauksen lisäksi parissa eri skenaariossa. Yhtenä skenaariovaihtoehtona on, että rankki käytetään biokaasun tuotantoon, jonka avulla saataisiin tuotettua tislauksessa tarvittava lämpö. Skenaariovaihtoehtona on myös, että sivutuotteena syntyvä rankki korvaisi soijarehun käyttöä, jolloin soijarehun käytöstä aiheutuvat päästöt voidaan vähentää etanolin päästöistä.



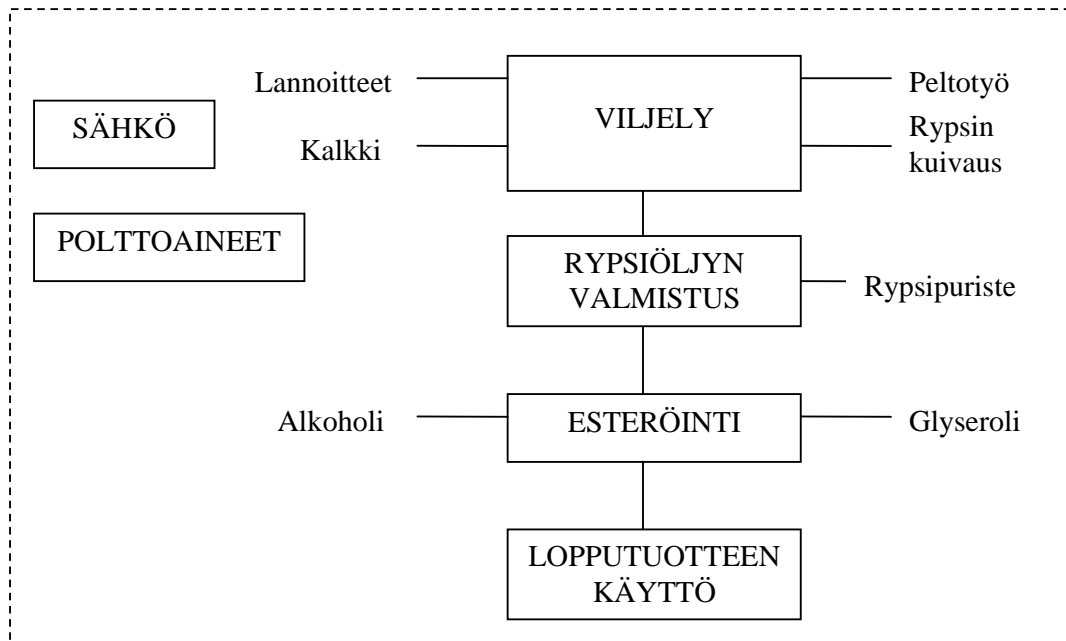
Kuva 1. Bioetanolin tuotannon systeemirajaus. Sähköä ja polttoaineita kuluu ketjun eri vaiheissa.

2.3.5. Biodiesel

Biodieselin tuotannon osalta tarkastellaan kahta vaihtoehtoa, jotka ovat 1. sukupolven tuotanto maatilakokoluokassa ja 2. sukupolven NExBTL-prosessi. Molemmissa vaihtoehtoissa biodieselin raaka-aineena on kotimainen rypsi.

Maatilakokoluokka

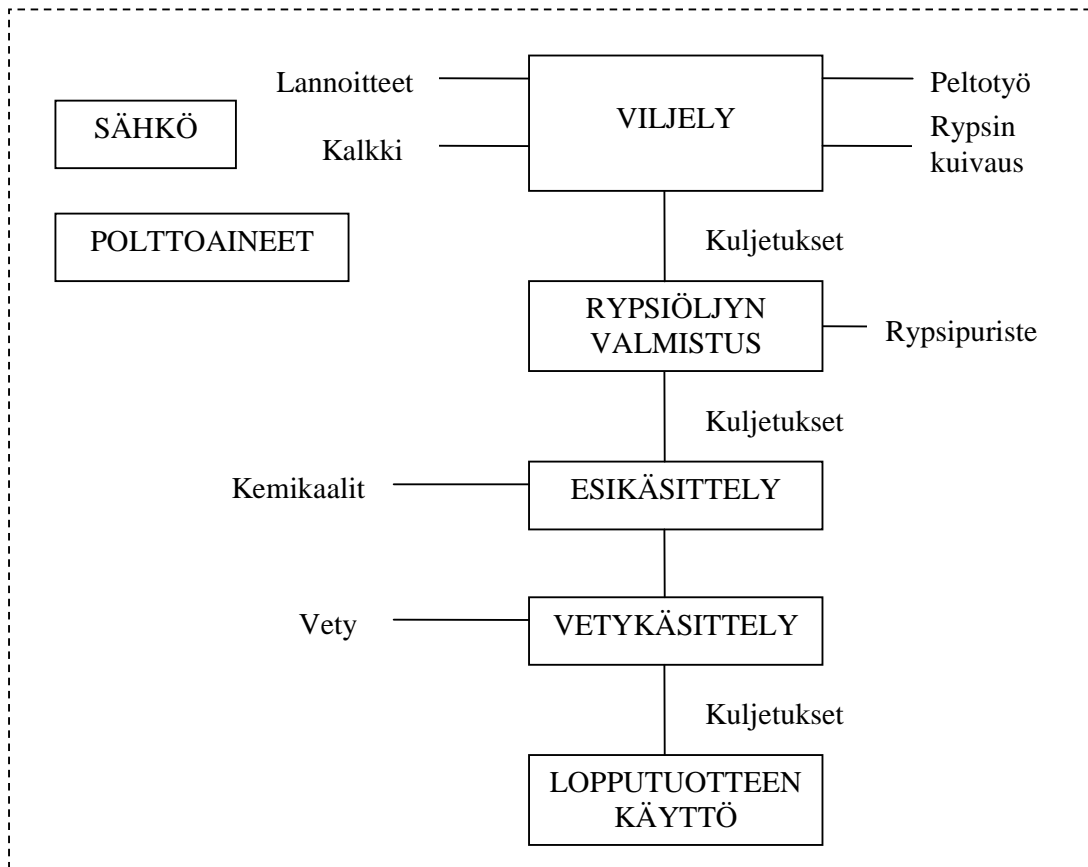
Maatilakokoluokan tuotannossa oletuksena on, että koko biodieselin valmistusprosessi tapahtuu maatilalla tai muussa pienessä tuotantoyksikössä lähellä raaka-ainetuotantoa. Biodieselin 1. sukupolven tuotannon vaiheet ovat rypsiöljyn puristus ja esteröinti. Tämän lisäksi tarkasteluissa otetaan huomioon rypsin viljely, panostuotanto (lannoitteiden ja kalkin tuotanto, siementuotanto), energiankulutus ja biodieselin käyttö, jota tarkastellaan erikseen muiden tutkimusten tulosten perusteella (kuva 2). Öljyn puristuksen sivutuotteena syntyy rypsipuristetta, jota voidaan käyttää esimerkiksi eläinten rehuna. Puristuksessa syntynyt öljy vaihtoesteröidään alkoholin, yleisimmin metanolin, kanssa. Katalyyttinä käytetään pieniä määriä natriumhydroksidia. Öljyn rasvahapot ja alkoholi muodostavat metyyliestereitä eli biodieseliä ja sivutuotteena glyserolia.



Kuva 2. Rypsi biodieselin maatilakokoluokan tuotannon systeemirajaus. Sähköä ja polttoaineita kuluu ketjun eri vaiheissa.

NExBTL

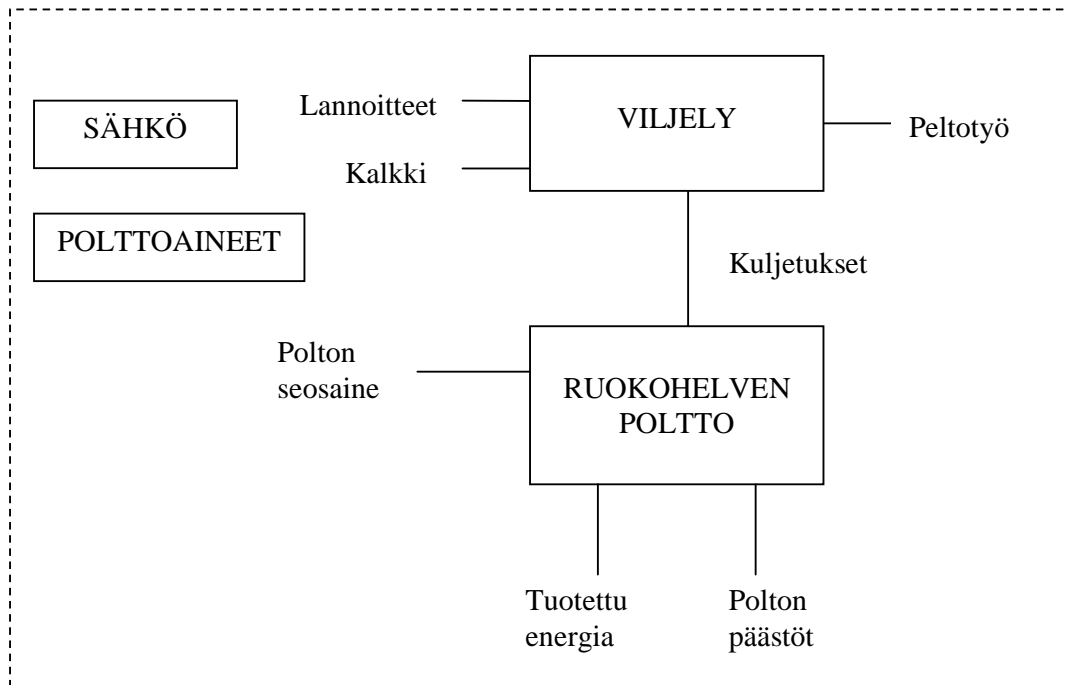
Toisen sukupolven NExBTL-prosessilla voidaan valmistaa biodieseliä kasviöljyistä ja eläinrasvoista. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kuitenkin vain rypsiöljystä valmistettua biodieseliä. NExBTL-ketjun systeemirajaus (kuva 3) noudattaa viljelyn osalta maatilakokoluokan biodieselin tuotannon systeemirajaus. Erona on, että NExBTL-ketjussa rypsit kuljetetaan Raision tuotantolaitokselle, jossa rypsiöljy valmistetaan. Rypsiöljy puolestaan kuljetetaan Nesteen NExBTL-laitokselle, jossa biodiesel valmistetaan. Biodieselin valmistus kasviöljyistä tapahtuu kahdessa vaiheessa, jotka ovat esikäsittely ja vetykäsittely. Valmis biodiesel kuljetetaan jakeluasemille loppukäyttöä varten, mutta tätä ei ole huomioitu laskelmissa. Myöskään käytön päästöjä ei NExBTL:n osalta otettu mukaan tarkasteluun, koska tästä ei ollut tietoja saatavilla.



Kuva 3. Rypsi biodieselin tuotannon systeemirajaus NExBTL-prosessilla. Sähköä ja polttoaineita kuluu ketjun eri vaiheissa.

2.3.6. Ruokohelpi, olki ja korsi

Ruokohelpin tuotantoa ja polttoa tarkasteltaessa huomioidaan ruokohelpin viljely, kuljetus polttolaitoksiin sekä ruokohelpin poltto (kuva 4). Viljelyn osalta huomioidaan panoksina lannoitus, kalkitus sekä työkoneiden polttoaineen kulutus hehtaaria kohden. Ruokohelpin viljelyä tarkastellaan sekä tavanomaisilla pelloilla että turvetuotannosta poistetuilla alueilla. Viljan oljen sekä rypsin ja rapsin korren osalta systeemirajaus noudattaa ruokohelpin systeemirajaukseen ottamatta viljelyä, koska olki ja korsi syntyvät muun viljelyn sivutuotteina. Oljen ja korren osalta tarkastelu alkaa siis korjuusta.



Kuva 4. Ruokohelpin polton tarkastelussa käytetty systeemirajaus. Sähköä ja polttoaineita kuluu ketjun eri vaiheissa.

3. RAAKA-AINEIDEN JA POLTTOAINEIDEN TUOTANTO

3.1. Bioetanoli

Tässä tutkimuksessa pääasiallisena etanolin raaka-ainelähteenä on käytetty ohraa, koska bioetanolin kotimaisissa valmistussuunnitelmissa pääasiallinen raaka-ainelähde on ollut ohra. Lisäksi tutkimuksessa esitellään vehnän osalta arvioita, jotka pohjautuvat Ruotsissa toimivaan laitokseen. Myös sokerijuurikasta ja perunaa tarkastellaan, mutta näiden raaka-aineiden osalta epävarmuustekijöitä on enemmän ja lisäksi raaka-aineiden kausiluontoisen saatavuuden johdosta on oletettu, että laitokset joutuvat käyttämään myös ohraa raaka-aineena.

3.1.1. Vehnän ja ohran tuotanto ja saatavuus

Viljapelto kynnetään tai sänkimuokataan jo edellisenä syksynä. Vilja kylvetään huhtitoukokuussa, jota ennen tehdään kylvömuokkaus, jonka avulla maa saatetaan kylvökuntoon. Kylvömuokkaukseen käytetään usein S-piikkiäestä, jolla pelto äestetään kahteen kertaan. Lisäksi savimaat täytyy tasausäestää ennen varsinaista kylvömuokkausta. Vilja kylvetään ja lannoitetaan samalla kertaa käyttäen kylvölannoitinta. Kylvölannoittimessa on jyräpyörästö, joka tiivistää kylvöksen. Jos pellon pinnalla on paljon kiviä, tarvitaan erillinen jyräys. Vilja voidaan kylvää myös suorakylvökoneella, jolloin perus- ja kylvömuokkausta ei tehdä. Ohra puidaan noin viikon kuluttua keltatuleentumisesta, kun jyvän kosteus on keskimäärin 22 %.

Kasvusto tulee puintikuntoon keskimäärin 9.8. eli 89 päivää kylvön jälkeen. Vilja kuivataan noin 13-14 %:n kosteuteen. (Mäkinen ym., 2006)

Vehnän ja ohran viljelyssä käytetään siemeniä noin 270 kg/ha. Viljojen lannoitteina käytetään moniravinteisia lannoitteita, jotka sisältävät typpeä, fosforia ja kaliumia sekä muita viljoille tarpeellisia kivennäisaineita. Mäkisen ym. (2006) mukaan ohran lannoitustarve on 100 kg typpeä, 18 kg fosforia ja 30 kg kaliumia hehtaaria kohden, jos viljely tapahtuu savimaalla. Lannoituksen lisäksi viljelypellot täytyy kalkita noin viiden vuoden välein. Tässä tutkimuksessa vehnän lannoituksessa on käytetty typpeä 134 kg/ha, fosforia 14 kg/ha ja kaliumia 26 kg/ha. Vastaavat lannoitusmäärät ohralle ovat typpeä 99 kg/ha, fosforia 17 kg/ha ja kaliumia 39 kg/ha. Tutkimuksessa käytetty kalkkimäärä viljapelloille on 685 kg/ha. Käytetyt tiedot perustuvat Pro Agrian lohkotietopankkiin.

Vuonna 2008 Suomessa viljeltiin vehnää yhteensä noin 220 000 hehtaaria, josta hieman alle 200 000 hehtaaria oli kevätvehnää. Vehnäsato oli yhteensä noin 790 miljoonaa kiloa. Ohran viljelyala puolestaan oli 585 000 hehtaaria vuonna 2008, josta rehuohran viljelypinta-ala oli noin 420 000 hehtaaria ja mallasohran noin 165 000 hehtaaria. Tuotetun ohran määrä oli 2 130 miljoonaa kiloa. (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009) Taulukossa 1 on esitetty vehnän ja ohran viljelyalat TE-keskuksittain sekä niiltä saadut sadot 14 %:n kosteudessa vuonna 2008.

Taulukko 1. Vehnän ja ohran viljelyalat ja sadot TE-keskuksittain vuonna 2008 (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009).

TE-keskus	Vehnä		Ohra	
	Ala 1000 ha	Sato 1000 t	Ala 1000 ha	Sato 1000 t
Uusimaa	52,3	183,2	44,8	163,9
Varsinais-Suomi	69,9	256,0	97,9	378,6
Satakunta	11,6	47,9	43,1	175,1
Häme	19,1	72,0	63,6	247,0
Pirkanmaa	11,7	39,5	36,2	130,6
Kaakkois-Suomi	17,7	60,6	31,6	113,6
Etelä-Savo	1,5	4,5	10,3	31,5
Pohjois-Savo	2,1	6,8	27,7	83,9
Pohjois-Karjala	2,0	7,3	11,3	37,2
Keski-Suomi	1,9	6,1	15,3	41,7
Etelä-Pohjanmaa	11,8	45,2	69,9	281,3
Pohjanmaa	9,3	40,1	72,3	287,4
Pohjois-Pohjanmaa	3,5	9,1	55,7	141,7
Kainuu	0,0	0,0	3,3	8,5
Lappi	0,0	0,0	1,7	3,9
Ahvenanmaa	1,8	9,2	0,8	2,7
Koko Suomi	220	790	590	2 130

Käytettäessä ohraa bioetanolin raaka-aineena, vaadittava viljelypinta-ala on 53 000 hehtaaria 50 000 tonnin vuosikapasiteetin laitokselle. Ohraraaka-ainetta käyttävä bioetanolilaitos on tutkimuksessa sijoitettu Hämeeseen, koska Hämeessä olisi riittävästi ohran tuotantokapasiteettia. Lisäksi Hämeenlinnan ammattikorkeakoulun

tutkimusten mukaan alueella toimii riittävästi sika- ja nautatiloja käyttämään hyväksi sivutuotteena syntyvää rankkia. Vehnää taas viljellään eniten Uudellamaalla ja Varsinais-Suomessa. Vehnää käyttävän laitoksen sijoittaminen esimerkiksi Salon seudulle olisi perusteltua, koska Varsinais-Suomessa on runsaasti sikatiloja, jotka voisivat käyttää hyväkseen sivutuotteena syntyviä rehujakeita.

3.1.2. Perunan ja sokerijuurikkaan tuotanto ja saatavuus

Perunanviljelytekniikka ja -toimenpiteet riippuvat perunan käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi siemenperunan viljelyssä tavoitteena on mahdollisimman suuri mukuloiden monistuvuus ja tasakokoisuus, johon pyritään keskimääräistä alhaisemmalla typpilannoituksella ja tiheällä istutuksella. Perunan ravinteiden oton kannalta optimaalinen maan pH on 6-6,5. Suomen peltojen keskimääräinen pH on 5,9 ja perunamailla jopa keskimääräistä alempi, joka haittaa perunoiden kasvua ja mukuloiden laatua. Perunamaiden kalkitusta suositellaan välikasvin viljelyn aikana. Sopiva kalkkimäärä on 4-5 tonnia hehtaarille. (Agrimarket) Tässä tutkimuksessa kalkkia on arvioitu käytettävän 673 kg/ha Pro Agrian lohkotietopankin tietojen perusteella.

Riittävä typen saanti on perunasadon muodostumisessa välttämätöntä. Typen kokonaistarve on perunalla 60-160 kg/ha. Lannoitetypen tarve riippuu suuresti käyttökohteesta, lajikkeesta, kasvuajasta ja maalajista. Fosforin kokonaistarve perunalla on 15-25 kg/ha ja kaliumin 150-300 kg/ha. Kaliumin merkitys perunan kasvun kannalta on selvästi pienempi kuin vaikutukset sisäiseen laatuun. Lannoitekaliumin käyttömäärä riippuukin paljolti perunan käyttötarkoituksesta ja lajikkeesta. (Agrimarket) Tässä tutkimuksessa käytetyt lannoitusmäärät ovat Pro Agrian lohkotietopankista ja ne ovat 69 kg typpeä, 28,5 kg fosforia ja 114 kg kaliumia hehtaaria kohden.

Sokerijuurikas on kaksivuotinen kasvi; ensimmäisenä vuotena se varastoi ravintoaineita juurensa ja toisena vuotena se kukkii ja tuottaa siemeniä. Juuret kuitenkin korjataan jo ensimmäisenä vuotena. Sokerijuurikas kasvaa parhaiten syvässä ja ravintopitoisessa maassa. Se kestää kylmää, mutta se ei siedä pakkasta, jonka vuoksi se kylvetään keväällä. Sadonkorjuu tapahtuu syksyllä, suosituksena on, että sisämaassa korjuu tehdään 20.10. mennessä ja rannikon läheisyydessä 31.10. mennessä (Farmit.net). Juurikkaat kerätään maasta koneella, joka myös leikkaa naatit ja lastaa juurikkaat perävaunuun. Naatit voidaan syöttää karjalle rehuna tai käyttää lannoitteena.

Jotta saavutetaan hyvä sokerijuurikkasato, täytyy huolehtia riittävästä kalkituksesta ja kasvinvuorotuksesta. Kasvinvuorotus vähentää monivuotisia rikkakasveja ja rajoittaa juurikasankeroisen esiintymistä. Lisäksi sokerijuurikkaalle tehdään kylvölannoitus, joka on yleensä 0-63 kg fosforia hehtaaria kohden sekä kivennäismailla 120-140 kg typpeä hehtaaria kohden ja eloperäisillä mailla 80-120 kg typpeä hehtaaria kohden (Farmit.net). Tässä tutkimuksessa käytetyt lannoitemäärät ovat sokerijuurikkaalle 128 kg N/ha, 26 kg P/ha ja 47 kg K/ha sekä kalkkia 673 kg/ha (Pro Agrian lohkotietopankki).

Perunaa viljeltiin vuonna 2008 noin 26 000 hehtaarilla, jolta saatiin satoa 685 000 tonnia. Perunan viljely jakautui ruokaperunaan (40 %), varhaisperunaan (4 %), ruokateollisuusperunaan (14 %), tärkkelysperunaan (27 %) ja muuhun perunaan (15 %). Sokerijuurikkaan viljelyala oli samana vuonna hieman alle 15 000 hehtaaria ja sato noin 470 000 tonnia. (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009) Taulukossa 2 on esitetty perunan ja sokerijuurikkaan viljelyalat TE-keskuksittain ja niiltä saadut sadot vuonna 2008. Taulukosta 2 nähdään, että sokerijuurikkaan viljely on keskittynyt Varsinais-Suomeen ja Satakuntaan. Myös Hämeessä viljellään sokerijuurikasta jonkin verran. Perunaa puolestaan viljellään eniten Pohjanmaalla, Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla sekä Satakunnassa.

Taulukko 2. Perunan ja sokerijuurikkaan viljelyalat ja sadot TE-keskuksittain vuonna 2008 (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009).

TE-keskus	Peruna		Sokerijuurikas	
	Ala 1000 ha	Sato 1000 t	Ala 1000 ha	Sato 1000 t
Uusimaa	0,5	9,8	0,6	20,6
Varsinais-Suomi	1,7	29,6	6,5	231,7
Satakunta	4,5	136,3	4,7	156,6
Häme	1,3	32,0	1,3	43,0
Pirkanmaa	0,4	9,9	0,0	0,0
Kaakkois-Suomi	0,5	15,3	0,0	0,0
Etelä-Savo	0,5	10,1	0,0	0,0
Pohjois-Savo	0,3	3,7	-	-
Pohjois-Karjala	0,2	4,2	-	-
Keski-Suomi	0,2	2,8	-	-
Etelä-Pohjanmaa	6,0	174,4	0,1	4,0
Pohjanmaa	5,7	165,3	0,3	7,2
Pohjois-Pohjanmaa	3,2	62,9	-	-
Kainuu	0,1	2,5	-	-
Lappi	0,2	2,8	-	-
Ahvenanmaa	0,9	22,8	0,1	4,9
Koko Suomi	26	685	15	470

Vaadittava perunan viljelypinta-ala on noin 6 400 hehtaaria, kun laitos tuottaa etanolia 50 000 tonnia vuodessa ja puolet tästä tuotetaan perunasta. Näin suuri laitos olisi mahdollista sijoittaa Pohjanmaalle, mutta siellä mahdollisena ongelmana olisi sivutuotteiden hyödyntäminen, koska alueella tuotetaan jo rankkirehua karjatilojen tarpeisiin. Muualla maassa taas ei tuoteta riittävästi perunaa tämän kokoluokan laitoksen tarpeisiin, joten skenaarion toteutuminen vaatisi perunantuotannon huomattavaa lisäämistä laitoksen kohdealueella. Tässä tutkimuksessa perunapohjainen laitos on sijoitettu Hämeeseen, mutta myös Satakunta olisi ollut hyvä sijoituspaikka.

Sokerijuurikasta raaka-aineena käyttävät bioetanolin tuotantolaitokset sijaitsevat Euroopassa usein sokeritehtaan yhteydessä (Enwald, 2009). Tämän perusteella sokerijuurikasetanolilaitoksen sijaintipaikka olisi Säköylä. Alueella on sokerijuurikkaan kasvattamiseen vaadittavaa tietotaitoa ja kasvatukseen sopivia maita. Sokerijuurikkaan tuotantoa voitaisiin alueella mahdollisesti lisätä bioetanolin tuotannon aiheuttaman lisäkysynnän vuoksi. Ohran tarve pystyttäisiin siellä myös tyydyttämään melko pieneltä alueelta (kuljetusmatka noin 50 km).

3.1.3. Bioetanolin tuotanto

Bioetanolin tuotannossa raaka-aineiden tarve vaihtelee suuresti raaka-aineesta riippuen. Eniten raaka-aineita vaativat sokeriruo' on ja sokerijuurikkaan käyttäminen, vähiten taas viljojen. Toisaalta taas sokeriruo' on ja sokerijuurikkaan hehtaarisadot ovat huomattavasti viljasatoja suurempia, joten hehtaaria kohden näistä saadaan bioetanolia kuitenkin enemmän kuin viljoista (taulukko 3). Taulukoista 3 ja 4 on huomioitava, että viljelykasvien sato vaihtelee maittain ja myös bioetanolin valmistusprosesseissa saanto vaihtelee hieman prosessiteknisistä ratkaisuksista riippuen, vaikka raaka-aine olisikin sama.

Taulukko 3. Eri viljelykasvien etanolin hehtaarisanto, sokeriruo' on ja maissi Brasilian oloissa (Xavier, 2007), sokerijuurikas (Nilsson, 2006) ja vehnä (Bernesson ym., 2006) Ruotsin oloissa ja perunan ja ohran satotasolähteenä Pro Agrian lohkotietopankin aineisto.

Raaka-aine	l/ha
Sokeriruo' on	7080
Sokerijuurikas	4370
Maissi	3570
Peruna	3000
Vehnä	2540
Ohra	1245

Taulukko 4. Raaka-aineiden tarpeita 1 m³ bioetanolin saannolle (SJV, 2004a), päitsi ohran lähde Enwald (2007).

Raaka-aine	kg/m ³
Sokeriruo' on	12 700
Maa-artisokka	12 500
Sokerijuurikas	10 300
Peruna	8 500
Puu	3 850
Melassi	3 600
Ohra	3 000
Maissi	2 680
Vehnä	2 600
Hirssi	2 300
Riisi	2 250

Esikäsittely

Etanolin valmistukseen käytettävä raaka-aine täytyy aluksi esikäsitellä. Viljan esikäsitelyssä viljasta otetaan ensin näytteet ja se puhdistetaan. Puhdistuksessa viljasta saadaan erotettua mm. kivet ja magneettiset ainekset (Jaakko Pöyry Oy, 2006). Ohranjyvät kuoritaan. Kuoria on mahdollista käyttää polttoainelähteenä tai niistä voidaan tehdä rehua. Sokerijuurikkaan esikäsitelyprosessiin kuuluvat kiven- ja ruohonerotus, pesu, leikkaus ja uutto. Uutosta saadaan fermentoinnin raaka-aineena käytettävää raakamehua. Sivutuotteena saatu puristeleike voidaan käyttää eläinten

rehuksi (Kymäläinen, 2007). Perunan esikäsitelyssä poistetaan hiekka, multa ja maaperän mikrobit (Liimatainen, 2004).

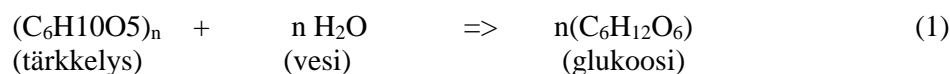
Murskaus

Punkaharjulle suunnitellussa tehtaassa puhdistetut jyvät jauhetaan jauhoksi, jonka partikkelikoko on 0,5 mm. Perunaprosessissa perunat murskataan, jonka lisäksi soluneste erotetaan ja aines seulotaan (Pääkkönen ym., 2004). Perunaprosessissa murskaus ei kuitenkaan ole välttämätöntä (Liimatainen, 2004). Prosessi kuluttaa jonkin verran sähkö- ja lämpöenergiaa.

Tärkkelysmolekyylien pilkkominen sokereiksi

Vehnän tärkkelyspitoisuus on 58-65 %. Perunan tärkkelyspitoisuus puolestaan on noin 70 % kuiva-aineesta ja 10-15 % tuorepainosta, lajikkeesta riippuen (Liimatainen, 2004). Perunan tärkkelyksen vesiliukoisuus on parempi ja viskositeetti suurempi kuin vehnän, riisin tai maissin tärkkelyksen. Perunan tärkkelyksen koostumuksesta 25 % on amylaasia ja 75 % amylopektiiniä (Liimatainen, 2004). Tärkkelys mäskätään eli muutetaan sokeriksi reaktioyhtälön 1 mukaisesti. Sokerijuurikkaan hiilihydraatit ovat jo valmiiksi sokerimuodossa, jonka vuoksi etanolin tuotanto sokerijuurikkaasta on yksinkertaisempaa ja halvempaa kuin tuotanto viljapohjaisesta raaka-aineesta (Edwards ym., 2006).

Reaktioyhtälö (1):



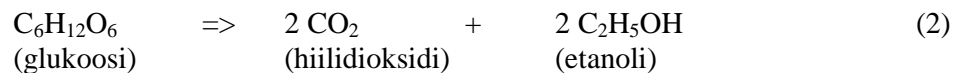
Selluloosapitoisten raaka-aineiden pilkkomiseen voidaan käyttää kolmea eri menetelmää, jotka ovat entsyymaattinen hydrolyysi, hydrolyysi vahvalla hapolla matalassa lämpötilassa ja hydrolyysi heikolla hapolla korkeassa lämpötilassa. Myös erilaisia kombinaatioita näistä menetelmistä voidaan käyttää. Nykyisin entsyymaattinen hydrolyysi on syrjäyttänyt happokäsittelyn (Liimatainen, 2004). Perunaprosessissa massaa keitetään 30-60 minuuttia perunan pilkkomisen jälkeen. Massaan lisätään alfa-amylaasia ja fosforihappoa. Tätä prosessivaihetta kutsutaan dekstroinniksi. Siinä polysakkaridit hajoavat vain osittain glukoosiksi. Dekstroinnin jälkeen toisessa entsyymikäsitelyssä tärkkelysmolekyyliä pilkkoo glukoamylaasi, joka hydrolysoi dekstroinnissa syntyneitä maltosakkarideja glukoosiksi. Glukoamylaasi on mahdollista lisätä prosessiin myös vasta fermentointivaiheessa (Liimatainen, 2004). Selluloosapitoisiin raaka-aineisiin perustuvaa bioetanolin tuotantoa ei tässä tutkimuksessa käsitellä.

Fermentointi

Fermentoinnissa tärkkelysmolekyylien pilkkomisesta tai uuttamalla saadut monosakkaridit hajoavat hiilidioksidiksi ja etanoliksi hiivojen myötävaikutuksella reaktioyhtälön 2 mukaisesti (Liimatainen, 2004). Yhdestä kilogrammasta glukoosia saadaan 0,51 kg etanolia ja 0,49 kg hiilidioksidia. Etanolin saanto on glukoosista ja fruktoosista 95-100 %, ja ksyloosista 40-90 % (Murphy & McCarthy, 2005).

Ksyloosin hajottaminen vaatii geenimanipuloitua hiivaa. Ksyloosia käyttävää bioetanolin tuotantoa ei tarkastella tässä tutkimuksessa.

Reaktioyhtälö (2):



Fermentointiprosessissa tapahtuva käyminen voi olla eräkäymisprosessi, kaskadiprosessi tai jatkuva prosessi. Punkaharjun prosessissa mäskiä on suunniteltu käytettävän viidessä peräkkäisessä kaskadifermentorissa, joissa on käynnissä jatkuva hiiwankehitys. Tehokas käymisaika on 40-50 tuntia, jonka jälkeen mäskin alkoholipitoisuus on 8 painoprosentin luokkaa. Myös Wilkie ym. (2000) esittävät fermentointiajan olevan tavallisesti samaa luokkaa eli noin kaksi vuorokautta. Liimataisen (2004) mukaan fermentoinnin viipymäaika on 1,5-9 vrk. Viipymäaika on pidempi pienillä laitoksilla. Enwaldin (2009) mukaan alkoholipitoisuus on fermentoinnin jälkeen usein noin 10 %. Joissakin tapauksissa alkoholipitoisuus on jopa 14 %. Wilkien ym. (2000) mukaan *Saccharomyces cerevisiae* – mikrobit sietävät 23 %:n etanolipitoisuutta. Perunaprosessissa fermentoinnin etanolipitoisuus on pienempi, ellei liuosta konsentroida, sillä perunan kuiva-ainepitoisuus on alhainen. Fermentoinnin pH:ta voidaan säätää ortofosforihapolla (Liimatainen, 2004).

Tislaus

Tislaus vaatii eniten energiaa etanolin valmistuksessa. Bernessonin ym. (2006) mukaan tislaus kuluttaa sähköenergiaa 78 MJ/t vehnää ja lämpöenergiaa 1 340 MJ/t vehnää. Tislausprosessissa käytetään erilaisia kolonneja etanolin erottamiseen mäskistä. Tekninen toteutus ja tislausvaiheiden lukumäärä vaihtelevat laitoksittain. Punkaharjulle suunnitellussa laitoksessa tislausprosessin muodostavat mäskikolonne ja väkevöintikolonne. Myös Lantmännen Agroetanolilla tislaus on kaksivaiheinen, mutta myös kolmivaiheinen tislaus on mahdollinen. (Wereco-Bobby & Hagan, 1996) Kun etanolipitoisuus on 95,6 %, saadaan atseotrooppinen seos, joka on laimeampi kuin puhdas etanoli. Tätä seosta ei saada enää tislamalla väkevämmäksi. Atseotrooppinen seos johdetaan edelleen dehydraatioon. Tislauksen energiankulutusta voidaan vähentää käyttämällä liuosta fermentoinnissa mahdollisimman suureen etanolipitoisuuteen. Dekantterien alite, joka sisältää pääosin vettä ja alkoholia, kierrätetään ja johdetaan takaisin tislaukseen.

Punkaharjun laitoksella tislauksysteemi on suunniteltu tuottamaan 92-painoprosenttista alkoholia. Systeemi muodostuu yhdestä tai kahdesta mäskikolonnist, aldehydipesurista ja väkevöintikolonnist. Sivuvirtojen erottamiseksi käytetään mm. aldehydipesureita. Perunasta muodostuu fermentoinnissa enemmän metanolia kuin viljapohjaisista raaka-aineista, joten tislausvaiheessa on oltava erillinen metanolinpoistoyksikkö. Metanoli erotetaan etanolista tislamalla (Liimatainen, 2004). Muiden epäpuhtauksien, kuten sikuna-alkoholien erottamiseen saatetaan tarvita tislausprosesseja, kuten uuttotislausta. Uuttotislauksen jälkeen laimentunut etanoli johdetaan uudelleenväkevöintikolonneihin (Liimatainen, 2004).

Dehydraatio ja denaturointi

Nykyisin dehydraatiomenetelmistä eniten käytössä ovat molekyyliseulat. Alkoholin sisältämän veden poisto perustuu selektiiviseen veden adsorptioon molekyyliseulan pedissä, josta etanolihöyry pääsee läpi. Dehydratoitu alkoholi (99,8-tilavuusprosenttia) otetaan höyrynä ulos molekyyliseulatankeista ja lauhdutetaan ennen säiliöön pumppaamista. Dehydraatio voidaan suorittaa myös tislamalla siten, että veden ja etanolin atseotrooppiseen seokseen lisätään sykloheksaania tai bentseeniä, jolloin tislautuu atseotrooppista seosta, joka sisältää 7,5 % vettä, 18,5 % etanolia ja 74 % bentseeniä. Kolonnin pohjalle jää puhdasta etanolia (mm. Schmitz, 2003, Liimatainen, 2004). Syntynyt etanoli denaturoidaan sen väärinkäytön estämiseksi. Denaturointikemikaaleja ovat mm. isobutanoli ja metyyliertääributyylieetteri (Bernesson, 2004).

Sivutuotteiden käsittely

Tislauksen sivutuotteena syntyy rankkia. Liimataisen (2004) mainitsemia tislausjätteen käsittelyvaihtoehtoja ovat mm. kierrättäminen takaisin etanolin tuotantoprosessiin, anaerobinen hajotus, polttaminen, jalostaminen lannoitteeksi, jalostaminen rehuksi ja sivutuotteiden valmistaminen. Jos sivutuotteista tehdään biokaasua, on mahdollista, että koko laitoksen energiantarve saadaan katettua sen avulla (Enwald, 2009).

Jos rankki kuivataan, se usein myös pelletoidään. Kuivauksen ja pelletoinnin jälkeen rankin kosteuspitoisuus on noin 10 %. Rankin kuivauksen ensimmäinen osa on esim. dekantointisentrifugit, joissa suurin osa kiintoaineista erotetaan. Useilla laitoksilla kiintoainekakku syötetään edelleen kuivureille. Nestejäte eli ohutrankki voidaan käyttää erikseen valkuaisrehuna tai sekoittaa kuivan rankin kanssa. Usein ohutrankki kerätään varastosäiliöön ja edelleen haihdutukseen, jolloin syntyvän siirapin kuiva-ainepitoisuus on 30-40 %. Suomen bioetanoli on esittänyt eräänä vaihtoehtona rankin polton kattilalaitoksessa, jolloin se kuivataan ennen polttoa noin 50 %:n kuiva-ainepitoisuuteen.

Lantmännen Agroetanolilla rankki kuivataan ja pelletoidään, jonka jälkeen siitä tehdään rehua. Rankkia syntyy 0,85 kg tuotettua etanolilitraa kohden. Rankin kuivausprosessi kuluttaa paljon energiaa, esimerkiksi Lantmännen Agroetanolilla se kuluttaa sähköä 217 MJ/t vehnää ja lämpöä 1 340 MJ/t vehnää (Bernesson ym., 2006, www.agroetanol.se). Syntyviä rehujakeita voidaan jaotella valkuaisrehuksi ja kuiturehuksi. Myös Suomen bioetanolilla on suunnitelmassa kuivata rankki samalla tavalla kuin Lantmännen Agroetanolilla. Rankki voidaan käyttää eläinten rehuksi myös kuivaamattomana, tällöin sen säilyvyys kuitenkin huononee ja kuljettaminen on hankalaa. Säilyvyyttä voidaan parantaa lisäämällä muurahaishappoa.

Jos etanolia tehdään sokerijuurikkaasta, saadaan lisäksi rehuikäyttöön sopivaa juurikasleikettä 27 % syötetystä sokerijuurikkasmäärästä. Käytettäessä perunaa raaka-aineena, syntyy sivutuotteena perunan solunestettä 72-87 % ja kuitua 2-3 % tärkkelyksestä. Solunestettä voidaan käyttää lannoitteena ja kuitua eläinten rehuna (Pääkkönen ym., 2004). Ohraetanolin valmistusprosessin sivutuotteena syntyy jyvien kuoria. Etanoliprosessissa syntyy myös jätevettä, jonka käsittelyn sähköenergiankulutukseksi ovat Bernesson ym. (2006) arvioineet 113 MJ/t etanolia.

Jos rankki biokaasutetaan, jäännöstä voidaan käyttää lannoitteena lannoitevalmistelain (539/2006) vaatimusten mukaisesti. On myös mahdollista jättää ohutrankki kuivaamatta ja käyttää se märkärehuna. Tässä tutkimuksessa oletetaan, että rankkia ei kuivata, koska sen on arvioitu olevan taloudellisesti kannattamatonta. Johtamalla rankki biokaasutukseen voidaan saada laitos toimimaan energiaomavaraisesti, mutta samalla menetetään rankin käyttömahdollisuudet rehuna.

Tässä tutkimuksessa sivuvirtaprosessit on otettu huomioon skenaariovaihtoehtoisissa. Tulokset on ilmoitettu siten, että kaikki kuormitukset on kohdennettu päätuotteelle, eli etanolille ja sivutuotteiden on oletettu korvaavan soija- tai ohrapohjaista rehua. Tämän lisäksi eri raaka-ainelähteille on laskettu skenaario, jossa rankki biokaasutetaan. Biokaasua on arvioitu Hämeenlinnan ammattikorkeakoulun selvityksessä (Kymäläinen, 2007) syntyvän 0,69 kg/kg rankin sisältämää kuiva-ainetta tai 572 m³/t rankin kuiva-ainetta ja tätä arviota on käytetty myös tämän tutkimuksen laskelmiin. Biokaasun metaanipitoisuudeksi on arvioitu 25 %, jonka pohjalta on tehty rankin biokaasutukseen perustuvat laskelmat.

Sivutuotteiden rehukäyttö

Valmistettaessa bioetanolia saadaan sivutuotteina eräitä rehuksi käyttökelpoisia jakeita, esimerkiksi rankkia, joka on sekä energia- että valkuaisrehu. Rankin koostumus vaihtelee suuresti riippuen käytetyistä raaka-aineista (McDonald, 1988). Paljon tutkittua tiivistettyä tärkkelysrankkia voidaan käyttää 20 % nautakarjan rehuannoksen kuiva-aineesta (Dahl, 2006). Lihasioillakin voitaisiin käyttää vastaavia määriä osuutena rehuyksikkösaannista. Jos suurta fosforiylijäämää halutaan välttää, kannattaa osuus rajoittaa 10 prosenttiin (Partanen, 2000). Vanhemmassa rankkikokeessa (Suomi, 1980) tuorerankkia (kuiva-aine 7,3 %) voitiin käyttää lihasikojen ruokinnassa 10 % rehuyksikkösaannista, suuremmilla määrillä esiintyi maittavuusongelmia. Perunarankista on vähemmän tutkimustietoja, mutta se vastaa koostumukseltaan vehnärankkia (HUV, 2009).

Kun perunasta valmistetaan tärkkelystä, saadaan erotettaessa perunapulppua ja solunestettä (Siljander-Rasi & Valaja, 2007). Perunapulppu on kuitupitoinen energiarehu, joka korvaa lähinnä karkearehuja ja kauraa. Se soveltuu käytettäväksi nautakarjalle, noin 15 % osuutena rehun kuiva-aineesta (Dahl, 2006). Lihasikojen loppukasvatukseen perunapulppua voidaan lisätä rehuannokseen 15 % rehuyksikkömäärästä, suurempi määrä alentaa teurasprosenttia (Siljander-Rasi & Valaja, 2007). Kun perunan solunesteen valkuainen saostetaan, saadaan perunaproteiinia, jonka kuiva-ainepitoisuus on noin 27 %. Raakavalkuaispitoisuus on hyvin korkea, 666 grammaa kuiva-aineessa. Kotimaisessa ruokintakokeessa on selvinnyt, että perunaproteiinia voidaan käyttää korvaamaan 75 % soijarouheen valkuaisesta (Siljander-Rasi & Valaja, 2007).

Kun sokerijuurikkaista valmistetaan sokeria, aloitetaan juurikkaiden pesulla ja raastamisella. Raastetusta juurikasmassasta uutetaan liukoinen aines ja jäljelle jää kuitupitoinen solunseinäaines. (McDonald ym., 1988) Se voidaan käyttää joko tuoreena (tuoreleike), kuivattuna (sokerijuurikasleike) tai kuivattuna melassin kanssa yhdistettynä (melassileike). Kaikki kolme ovat erittäin arvokkaita nautakarjan rehuja, etenkin korkeatuottoisille lypsylehmille. Niitä voidaan käyttää 40 % rehuannoksen kuiva-aineesta (Dahl, 2006).

Sokerijuurikkaasta uutetusta nesteestä erotetaan sokeri kiteinä. Jäljelle jää sokeripitoinen melassi, joka on käyttökelpoista rehua. Sitä voidaan käyttää 10 % märehitöiden rehun kuiva-aineesta (Dahl, 2006). Jos melassia käytetään etanolintuotantoon, tislauksen sivutuotteena tulee melassirankkia. Vanhojen saksalaisten tutkimusten (Becker & Nehring, 1967) mukaan melassirankin korkea tuhkapitoisuus haittaa sen rehukäyttöä. Ei ole tietoa, ovatko rankin ominaisuudet samat, jos etanoli tehdään sokerijuurikkasmehusta, mistä kidesokeria ei ole erotettu pois. Kaikkia märkiä rehuja käytettäessä on huomioitava niiden säilyvyys ja kuljetuskustannukset. Kun tuotantolaitoksia suunnitellaan, olisi sivutuoterehuja käyttäviä tiloja hyvä olla riittävästi taloudellisesti kannattavan kuljetusmatkan sisällä (Sten, 2007).

3.2. Biodiesel

3.2.1. Rypsin tuotanto ja saatavuus

Rypsi on melko uusi viljelykasvi Suomessa, sen viljely yleistyi vasta 1980-luvulla. Rypsiä kasvatetaan Suomessa ilmastollisella äärialueella, jonka vuoksi suhteellisen hyvä satotaso on tärkeä tekijä. Satotasot kasvoivatkin tasaisesti 1990-luvun alkuun saakka, jonka jälkeen keskisadot ovat laskeneet. Satotason laskun syiksi on esitetty ravinteiden epäsuhtaista käyttöä, viljelytekniikkaa, peltojen huonoa kuntoa ja rikkilaskeuman pienentymistä. Rypsistä on olemassa sekä syys- että kevätlajikkeet. Suomessa viljellään pääasiassa kevätrypsiiä. Rypsi kylvetään Etelä-Suomessa toukokuun toisella viikolla. Sen kukinta alkaa yleensä 20.-30.6. ja puintiaika on syyskuun ensimmäisellä tai toisella viikolla. Rypsin kasvuaika kylvöstä puintiin on 101-103 päivää. Rypsiä voidaan viljellä samalla loholla vain joka neljäs tai viides vuosi tauririskien vuoksi. (Mäkinen ym., 2006)

Ennen rypsin viljelyä pelto kynnetään syksyllä tai vaihtoehtoisesti tehdään kevyempi sänkimuokkaus. Lisäksi tehdään kylvömuokkaus, joka rypsilä on viljoja matalampi, noin 2-3 cm syvä. Kylvömuokkaukseen käytetään usein S-piikkiästä, jolla ajetaan kahteen tai kolmeen kertaan, jotta pellon pinta saadaan muokattua riittävän hienoksi. Savimailla tehdään yleensä tasausäestys, joka hidastaa maan kuivumista. Tämän jälkeen kylvetään siemenet ja lannoitetaan useimmiten yhtä aikaa kylvölannoittimella. Siemeniä kylvetään noin 8 kg/ha. Lannoitukseen käytetään moniravinteisia lannoitteita, jotka sisältävät typpeä, fosforia ja kaliumia sekä muita kasville tarpeellisia kivennäisaineita. Lannoitusmäärät rypsilä ovat noin 110 kg typpeä, 14 kg fosforia ja 25 kg kaliumia hehtaaria kohden vuodessa. Kalkkia levitetään keskimäärin noin 347 kg/ha vuodessa. (Pro Agrarian lohkotietopankki)

Rypsi on kokonaissadoltaan ja viljelypinta-alaltaan Suomen ylivoimaisesti merkittävin öljykasvi. Sen viljelypinta-ala oli noin 50 000 hehtaaria vuonna 2008, jolta saatiin satoa noin 70 000 tonnia (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009). Taulukkoon 5 on eritelty rypsin viljelyalat TE-keskuksittain sekä näiltä aloilta saatavat sadot 9 %:n kosteudessa. Taulukosta 5 nähdään, että rypsin viljely on keskittynyt Etelä- ja Lounais-Suomeen, Hämeeseen sekä Etelä-Pohjanmaalle. Tätä ei kuitenkaan ole otettu huomioon RME:n tuotannossa, sillä tutkimuksessa ei ole käytetty teoreettisesti sijoitettua biodiesellaitosta, koska pienen mittakaavan tuotanto voi sijoittua mihin päin Suomea vain, sopivien tilojen

läheisyyteen. NExBTL:n tuotannossa puolestaan rypsiöljyn puristus tapahtuu Raisiossa, Lounais-Suomessa, jonka läheisyydestä rypsiä on saatavilla runsaasti.

Taulukko 5. Rypsin viljelyalat ja sadot TE-keskuksittain vuonna 2008 (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009).

TE-keskus	Ala 1000 ha	Sato 1000 t
Uusimaa	6,4	8,9
Varsinais-Suomi	11,3	14,9
Satakunta	2,8	4,3
Häme	6,7	11,5
Pirkanmaa	5,4	6,9
Kaakkois-Suomi	4,6	6,3
Etelä-Savo	0,4	0,5
Pohjois-Savo	0,9	0,9
Pohjois-Karjala	0,7	0,6
Keski-Suomi	1,1	1,3
Etelä-Pohjanmaa	6,6	7,5
Pohjanmaa	4,0	5,3
Pohjois-Pohjanmaa	1,4	1,1
Kainuu	0,1	0,0
Lappi	-	-
Ahvenanmaa	0,3	0,6
Koko Suomi	50	70

Rypsin viljelyä on Suomessa pyritty edistämään monista eri syistä, joita ovat esimerkiksi viljelykierron monipuolistaminen ja maan kasvukunnon ylläpito. Rypsi jättää peltoon myös maan rakennetta parantavaa juurimassaa. Esikasvina rypsi parantaakin seuraavan vuoden viljasatoa esimerkiksi vehnän, ohran ja kauran viljelyssä. Suomen öljykasvistrategia 2000–2005 tavoitteli viljelyalan nostamista 100 000 hehtaariin, jossa ei kuitenkaan onnistuttu pelkän maatalouden tukipolitiikan avulla. (Vihma ym., 2006)

Biodieselin raaka-aineena voitaisiin käyttää rypsin lisäksi myös rapsia, mutta sitä viljellään Suomessa niin vähän, että se on jätetty tarkastelujen ulkopuolelle. Viljelyteknisesti rypsi ja rapsi ovat hyvin toistensa kaltaisia, mutta rapsin kasvu-aika on noin 10 vuorokautta pidempi kuin rypsin. Rapsin hehtaarisato on viime aikoina ollut jonkin verran rypsiä suurempi (rapsi 1665 kg/ha, rypsi 1416 kg/ha, Pro Agrian lohkotietopankki).

3.2.2. Biodieselin tuotanto

Biodieseliä voidaan valmistaa kahdella eri menetelmällä, joita ovat perinteinen bioöljyn vaihtoesteröinti alkoholin kanssa ja uudempi synteettinen bioöljyn vetykäsittely. Tässä työssä tarkastellaan molempia menetelmiä, jolloin biodieselin tuotanto koostuu joko rypsiöljyn valmistuksesta ja esteröinnistä pienessä kokoluokassa tai rypsiöljyn valmistuksesta ja vetykäsittelystä NExBTL-prosessissa.

Rypsiöljyn valmistus

Rypsiöljyn valmistuksessa on yleensä kaksi päävaihetta, jotka ovat puristus ja uutto. Kemiolliseen uuttoon perustuvalla laitteistolla päästään noin 34 % öljysaantoon siemenmassasta (Vihma ym., 2006). Rypsiöljyä voidaan valmistaa myös pelkällä puristuksella, mutta uutotekniikassa puristuksessa saadaan erotettua noin 40 % öljystä ja loppu 60 % saadaan erotettua uuttovaiheessa. Heksaani on yleisin uutossa käytettävä liuotinaine. Maatilakokoluokan tuotannossa ei kuitenkaan käytetä uuttoa, joka yksinkertaistaa prosessia, mutta öljysaanto jää pienemmäksi. Puristuksen öljysaanto riippuu voimakkaasti rypsierän laadusta.

Rypsin puristuksen sivutuotteena syntyvää rypsipuristetta voidaan käyttää sikojen ja nautaeläinten rehuna, jolla voidaan korvata soijarehun käyttöä. Muita rypsipuristeen käyttökohteita voivat olla lämmitys, kompostointi ja kotieläinten alustat, mutta ne ovat taloudellisesti vähempiarvoisia hyödyntämistapoja. (Vihma ym., 2006)

Esteröinti

Esteröinti on tasapainoreaktio, jossa öljyn sisältämät vaha-ainesosat vaihtoesteröidään alkoholin, yleisimmin metanolin, kanssa. Myös etanolin käyttö on mahdollista, mutta se on metanolia hankalampaa puhtaaksi tislattun etanolin sisältämän veden takia. Öljyn rasvahapot ja metanoli muodostavat metyyliestereitä (Fatty Acid Methyl Esthers, FAME) eli biodieseliä ja sivutuotteina glyserolia. (Vihma ym., 2006)

Metanolin käyttötarve vaihtelee biodieselin valmistuksessa käytettävän öljyn rasvahappokoostumuksen ja laitetekniikan mukaan. Pienlaitteistolla metanolin käyttötarve on 20-25 tilavuusprosenttia esteröitävän öljyn tilavuudesta eli yhden öljykilon esteröimiseen tarvitaan 0,18-0,22 kg metanolia, kun rypsiöljyn tiheys on 0,885 kg/l ja metanolin 0,79 kg/l. (Vihma ym., 2006)

Esteröinnissä voidaan käyttää katalyyttinä emästä tai happoa prosessin kiihdyttämiseksi. Pienen mittakaavan laitteissa käytetään teknisen yksinkertaisuuden vuoksi yleensä vain lipeää (NaOH). Tällöin öljyn sisältämät vapaat rasvahapot saattavat aiheuttaa ongelmia ja sivutuotteena syntyvää glyserolia muodostuu normaalia enemmän. Tehokkaammin prosessi toimii monivaiheisena, jolloin esimerkiksi saadaan aikaan ensin esterifikaatio hapolla ja tämän jälkeen transesterifikaatio emäksellä. Rypsiöljyllä katalyytin tarve on karkeasti arvioituna 3,5 grammaa lipeää esteröitävää öljylitraa kohden. (Vihma ym., 2006)

Esteröinnissä syntyvän glyserolin määrä riippuu prosessin tehokkuudesta ja käytetystä öljystä. Pienen mittakaavan laitteilla glyserolia saattaa muodostua yli 25 % käytetyn öljyn määrästä, kun tehokkaassa monivaiheisessa prosessissa glyserolia syntyy vain muutamia prosentteja. Puhtaalla glyserolilla, josta on poistettu saippuat sekä katalyytti- ja alkoholiyli jäämät, on runsaasti teollisia käyttökohteita. Todennäköinen maatilamittakaavassa tuotetun raakaglyserolin käyttömuoto on Vihman ym. (2006) mukaan sen polttaminen seoksena jonkin kiinteän polttoaineen kanssa.

NExBTL-prosessi

NExBTL-prosessi muodostuu kahdesta vaiheesta, jotka ovat esikäsitely ja vetykäsitely. Esikäsitelyssä biodieselin valmistuksen raaka-aineena käytettävät materiaalit puhdistetaan. Esikäsitelyn panoksia ovat sähkö, höyry, kemikaalit ja vesi. Kemikaaleja käytetään noin 0,2 % raaka-aineiden määrästä. Esikäsitelyn tehokkuus on korkea, prosessissa syntyy vain pieniä määriä kiinteitä jätteitä. Kiinteät jätteet kuivataan ja lähetetään jatkokäsittelyyn, jossa niistä tehdään energiaa. Lisäksi esikäsitelystä syntyy jättevettä, joka sisältää fosforia. (Nikander, 2008)

Esikäsitelty raaka-aine pumpataan vetykäsitelyyn, jossa kasviöljyjen triglyseriinit muutetaan tyydyttyneiksi suoraketjuisiksi hiilivedyiksi. Triglyserideissä oleva happi muutetaan vedeksi, hiilimonoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Vetykäsitely on eksoterminen reaktio, joka tarkoittaa, että prosessissa muodostuu lämpöä. Vetykäsitelyn panoksia ovat sähkö, höyry, vety ja jäähdytysvesi. Vetyä tarvitaan noin 42 kg, jotta saadaan tuotettua 1000 kg biopolttoainetta. Vetykäsitelyn päätuote on NExBTL-polttoaine. Tämän lisäksi syntyy pieniä määriä propaania, biobensiiniä ja vettä. (Nikander, 2008)

Vedyn tuotanto NExBTL-prosessiin

Vedyn tuotanto perustuu savukaasujen ja maakaasun sekoituksen höyryreformointiin. Reformoinnissa metaani ja höyry reagoivat muodostaen vetyä ja hiilimonoksidia. Tämän jälkeen on siirtoreaktio, jossa hiilimonoksidi ja höyry reagoivat muodostaen lisää vetyä. Tuotettu vety täytyy jäähdyttää ja puhdistaa ennen käyttöä. Vedyn tuotannon panoksia ovat sähkö, maakaasu, savukaasut ja prosessivesi. Prosessissa syntyy puhdasta vetyä, höyryä ja hieman hiilidioksidipäästöjä. (Nikander, 2008)

Rypsipuriste ja sen rehukäyttö

Syntyvissä rypsipuristeissa ja -rouheissa on rasvaa 44-99 g kuiva-ainekilossa. Maatiloilla suoritetussa kylmäpuristuksessa isompi osa öljystä jää rypsipuristeeseen, noin 248 g/kuiva-ainekilo. Kokonaisessa rypsin siemenessä öljyä on 415 g kuiva-ainekilossa. Rypsirouhe soveltuu märehitijöiden ainoaksi valkuaisrehuksi, samoin kuin yli 55 kiloille lihasioille ja tiineille emakoille. Alle 55 kiloilla lihasioilla käyttömäärä on 22 % ja porsaille 7 % rehuyksikkömäärästä (Siljander-Rasi ym., 2006). Siipikarjalla sitä voidaan käyttää alle 4 viikkoa vanhoilla linnuilla 5 % ja yli 4 viikkoa vanhoilla 8 % rehuannoksesta. Haittoja voi tulla rypsirouheen sisältämistä tanniineista, rikistä ja matalasta energiapitoisuudesta. Jos rypsiä syötetään ruskeita munia tekeville kanoille, voi ainakin vanhoilla jalosteilla esiintyä munissa kalan makua (Leeson & Summers, 2005).

Rypsipuristeen käyttöä märehitijöille voi rajoittaa sen rypsirouhetta suurempi rasvapitoisuus. Käytännössä tilannetta, missä rehuannoksen rasvapitoisuus lähenee haitallista 100 g kuiva-ainekilossa (McDonald ym., 1988), voi esiintyä vain lypsylehmillä käytettäessä toisena väkirehuna kauraa. Lihasioilla rypsipuristeen rasva vaikuttaa haitallisesti silavan laatuun, joten sitä voi lisätä vain 10 % rehuseoksen rehuyksikkömäärästä. Sen sijaan emakoille sitä voi käyttää ainoana valkuaisrehuna (Siljander-Rasi ym., 2006).

Rypsistä peräisin olevat valkuaisrehut korvaavat lähinnä soijarouhetta. Koska valkuaisrehujen omavaraisuus etenkin luomurehujen osalta on 10-15 % luokkaa, ei rypsistä peräisin olevien valkuaisrehujen menekki aseta rajoja niiden tuottamiseen (Vihma ym., 2006).

3.3. Kiinteät polttoaineet

3.3.1. Ruokohelpi

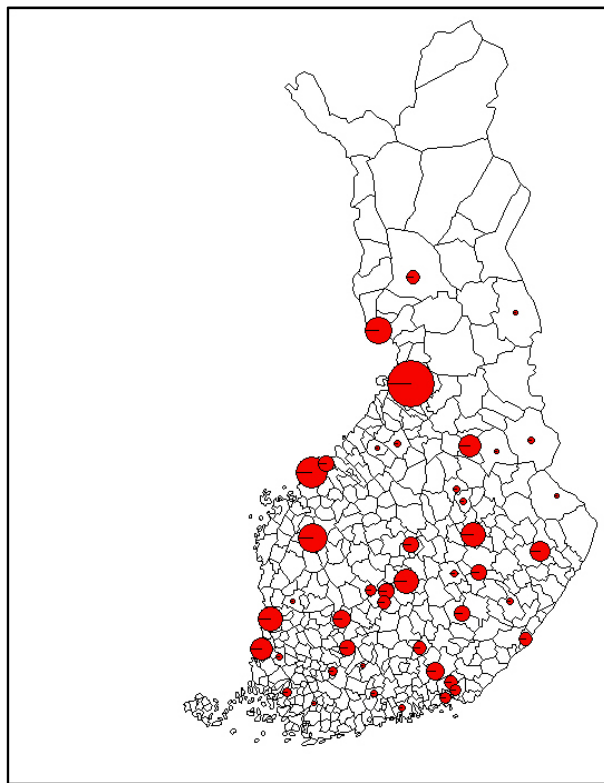
Ruokohelpi (*Phalaris Arundanicea* L.) on monivuotinen heinäkasvi, jota perinteisesti viljellään rehuksi. Luonnollisissa kasvuolosuhteissa ruokohelpi kasvaa noin kaksi metriä korkeaksi tiiviiksi kasvustoksi. Ruokohelpin juurakot yltyvät vajaan kymmenen senttimetrin syvyyteen, itse juurten yltyessä useita metrejä maan alle. Ruokohelpi tarvitsee noin kaksi kesää täysimittaisen juurakon ja maanpäällisen kasvuston kehittämiseen. Ruokohelpi tulee toimeen vähällä hoidolla, eikä sen viljelyn aloittaminen vaadi mittavia toimenpiteitä. Viljelyolosuhteissa kasvuston pituus voi olla jopa neljä metriä (Pahkala ym., 2005). Ruokohelpeä voidaan viljellä myös turvetuotannosta poistetuilla alueilla.

Ensimmäinen sato voidaan korjata kahden vuoden kuluttua kylvöstä. Hyvän sadon saamiseksi ruokohelpi tulee kylvää alkukesästä, mieluummin samoihin aikoihin viljan kylvön kanssa. Mitä pohjoisempana ruokohelpeä viljellään, sitä aiemmin kylvö tulee suorittaa. Ruokohelpeä voidaan myös suorakylvää onnistuneesti multavilla mailla, mutta muunlaisessa maaperässä tätä ei suositella. Ruokohelpin niittäminen kylvövuonna hidastaa kasvuston kasvamista merkittävästi. Koska ensimmäisen vuoden sato on vielä pieni, saadaan viljelmästä suurempi hyöty, kun ensimmäinen niitto ajoitetaan vasta toiselle viljelyvuodelle.

Sadon maksimoimiseksi tehtäviä maanhoidollisia toimenpiteitä ovat pellon tasoittaminen eli kivien ja kantojen poistaminen pellostä, sekä tarvittava typpi-, fosfori- ja kaliumlannoitus. Lannoitus tulee suorittaa ravinnetaseselvityksen ja viljavuustutkimuksen avulla muodostettujen lannoitussuosituksen mukaisesti. Tyypillisesti maaperään lisätään tyypeä viljelyä aloitettaessa noin 50 kg/ha ja satovuosina noin 70 kg/ha (Pahkala ym., 2005). Fosforin ja kaliumin tarve vaihtelee maaperän kunnon mukaan, ollen 0-50 kg/ha. Ruokohelpin viljely voidaan lopettaa kemiallisesti glyfosaatilla vuodessa tai hitaammin mekaanisesti. Yksivuotisia kasveja viljelemällä ja syyskynnön avulla viljely voidaan lopettaa kolmen vuoden kuluessa.

Ruokohelpistä saatava sato voi olla hieman suurempi kevätkorjuussa kuin syyskorjuussa (esim. Pahkala ym., 2005), koska keväällä korjatun sadon kuiva-ainepitoisuus on korkeampi. Myös leikkuukorkeus tulee pitää mahdollisimman matalana, jota edistää pellon tasoittaminen ja kivien ja kantojen poistaminen ennen viljelyn aloittamista. Sadon korjaamiseksi voidaan käyttää joko irtokorjuuta tai paalausta. Paalauksen työvaiheet ovat niitto, paalaus ja paalien kuljetus aumalle. Vastaavasti irtokorjuun työvaiheet ovat niitto, kasvuston silppuaminen perävaunuun ja kuljetus aumavarastoon. Paalit voidaan varastoida ulkoomaan, mutta irtosilppu pitää varastoida säilörehun tapaan. Helpin korjuutappioita voidaan alentaa 20-30 %:iin käyttämällä niittoon lautasniittokonetta tai niittomurskainta, jonka murskainosa on säädetty väljäksi ja kierrosnopeutta on alennettu (Paappanen ym., 2008).

Suomessa viljeltiin vuonna 2008 ruokohelpeä yhteensä 20 000 hehtaarilla, joista Vapon viljelmiä vanhoilla turvetuotantoalueilla oli noin 4 000 hehtaaria (VAPO Oy, 2008). Flyktmanin & Paappasen (2005) tekemän selvityksen mukaan Suomessa on noin 50 ruokohelpin polttoon soveltuvaa voimalaitosta. Lisäksi ainoastaan lämpöä tuottavia laitoksia, jotka soveltuvat ruokohelpin polttoon, on noin 25. Tämä tarkoittaa, että ruokohelpin leijupolton tekniseksi käyttöpotentiaaliksi saadaan noin 4,1 TWh, joka tarkoittaa noin 190 000 hehtaarin viljelypinta-alaa, kun satotaso on 22 MWh/ha. Jos satotaso nousee tasolle 30 MWh/ha, olisi viljelypinta-alan tarve noin 140 000 hehtaaria. Leijupolton lisäksi ruokohelpeä voitaisiin polttaa pieninä osuuksina myös pienissä lämpövoimaloissa, joissa on käytössä arinapoltteknikka. Näiden laitosten tekninen käyttöpotentiaali lisäisi viljelypinta-alan tarvetta 10 000 hehtaaria. Ruokohelpin viljelypinta-alaa voitaisiin siis lisätä huomattavasti polttoon soveltuvien laitosten läheisyydessä. Kuvassa 5 on esitetty ruokohelpin polttoon soveltuvien voimalaitosten sijainnit.



Kuva 5. Ruokohelpin polttoon soveltuvien voimalaitosten sijainnit (Flyktman & Paappanen, 2005).

Kuvasta 5 nähdään, että ruokohelpin polttoon soveltuvat voimalaitokset sijoittuvat eri puolille Suomea, lukuun ottamatta aivan pohjoisinta Suomea. Suurimmat ruokohelpin polttoon soveltuvat voimalaitokset ovat Oulun energia (Toppila), Oy Alholmens Kraft Ab (Pietarsaari) ja Vaskiluodon Voima Oy (Seinäjoen voimalaitos) (Flyktman & Paappanen, 2005). Suurimmat laitokset sijaitsevat siis Länsi-Suomessa, kun Itä-Suomessa on vain joitakin pienehköjä laitoksia.

Ruokohelpi-kyselytutkimus

Ruokohelpi-kyselytutkimuksessa pyrittiin saamaan selville erityisesti ruokohelpin viljelyn satotaso Suomessa ja satotasoon vaikuttavia tekijöitä. Tutkimus toteutettiin postitse lähetettynä kyselynä Vapon sopimustuottajille, jotka ovat antaneet luvan osoitetietojensa käyttämiseen. Kyselyssä kiinnitettiin huomiota viljelyshehtaareihin, kokonaissatoon, viljelyksen perustamisvuoteen, lannoitustasoon, kalkitukseen ja maan P-lukuun. Lisäksi kysyttiin yleisimmin käytettyjä lannoitteita, lantaa ja kalkkityyppiä, polttoaineen kulutusta, viljelyn maan maaperätyyppiä, ruokohelpin korjuutapaa, korjuussa käytettyä konetyyppiä ja polttolaitosta, johon ruokohelpi toimitetaan. Miltei kaikki kyselytutkimukseen vastanneet olivat perustaneet viljelmänsä vasta vuonna 2004 tai sen jälkeen.

Saatujen vastausten lukumäärä on juuri ja juuri riittävä johtopäätösten tekemiseksi satotasosta. Myös fosforia ja typpeä koskevat lukuarvot lienevät luotettavia. Kuljetusmatkoja ja P-lukuja koskevat vastaukset voidaan hyväksyä vertailtavaksi kirjallisuudesta saataviin arvoihin. Sen sijaan polttoaineen kulutuksen (27 kpl) ja kalkituksen (21 kpl) lukuja tulee tarkastella kriittisesti. Polttoaineen kulutusta pyrittiin kysymään koko peltotyöskentelyn osalta, mutta osa vastaajista oli kirjannut vain esimerkiksi omien laitteidensa polttoaineen kulutuksen. Toisaalta polttoaineen kulutuksen otosjoukko on pieni, osittain johtuen myös vastaajien vaillinaisista tiedoista esimerkiksi palkollisten käyttämien laitteiden osalta. Esimerkiksi Paappasen ym. (2008) ruokohelpin korjuulle antamista tuloksista voidaan ratkaista korjuulaitteiston kulkemaksi matkaksi noin 20 kilometriä hehtaaria kohden. Kun huomioidaan korjuulaitteiston polttoaineen kulutus, voidaan päätellä, että polttoaineen kulutukselle kyselytutkimuksessa saatu lukuarvo on epäluotettava; korjuulaitteiston polttoaineen kulutukselle saatu kirjallisuusarvo hehtaaria kohden on vähintään noin 30-kertainen. Kalkituksen määrä on lähellä nurmikasvien kalkitussuosituksista, kuten ruokohelpin kalkitussuosituksista on aiemmin kirjallisuudessa todettu (Pahkala ym., 2005).

Kyselytutkimuksessa saatu satotason alhaisuus voi selittyä korjuutappioiden eroilla koe- ja maatiloilla. On esitetty, että jopa 40-50 prosenttia kasvustosta voi jäädä pellolle liian pitkänä sänkenä tai varisemistappioiden (Lötjönen, 2007). Toinen selittävä tekijä on, että kaikilla kyselytutkimuksiin vastanneilla on nuoret viljelmät. Satotason tiedetään olevan 20-40 prosenttia pienempi ensimmäisen satovuoden jälkeen kuin tulevina satovuosina (Pahkala ym., 2005).

Muita kyselylomakkeella kysytyjä asioita olivat ruokohelpisadon keräystapa viljelyalueelta (paalaus/irtokorjuu), korjuussa käytetyt koneet, käytettyjen lannoitteiden ja kalkkien merkit, viljelysmaan tyyppi (multa/hieta/hiesu/savi) sekä lannan mahdollinen käyttö ruokohelpin viljelyssä. Vaikka laadullisiin kysymyksiin vastattiin useissa palautetuista kyselylomakkeista, vastauksissa oli samalla suurta hajontaa. Näyttää kuitenkin siltä, että Suomessa ruokohelpin korjaamisessa vakiintunut käytäntö on paalata saatu sato; kysymykseen vastanneista 60 paalasi oman satonsa, pelkkää irtokorjuuta ei käyttänyt yhtään vastaajaa, ja sekä irtokorjuuta että paalausta oli käyttänyt 3 vastaajista. Paalausta on suositeltu myös tutkimuksissa (esim. Lötjönen & Isolahti, 2006).

Ruokohelpin korjauksessa käytettäviä laitteita on monenlaisia, ja niitä voidaan käyttää eri kombinaatioissa: ruokohelpin viljelyssä voidaan käyttää mm. lautasniittokonetta, ketjuharavaa, pyöröpaalainta, rankakouraa ja takakuormaajaa. Näiden käyttöä ei vastauksissa ollut eritelty, osittain sen takia, ettei erittelyä nähty tärkeänä kyselylomaketta muotoiltaessa. Tämän vuoksi vastauksille koneiden käytöstä ei jäänyt paljoa tilaa.

Samoin kuin korjauksessa käytetyissä koneissa, myös sekä käytetyissä lannoitteissa ja lannassa että kalkituksessa oli suurta hajontaa. Vastaajista 13 mainitsi käyttämänsä kalkkityypin. Kalkin toimittajan mainitsi 14 vastaajaa. Suosituimpia toimittajia olivat Siilinjärven kalkki (8/14) ja Nordkalk (2/14). Suosituin kalkkityyppi oli dolomiittikalkki (5/13). Kuten nähdään, kalkitusmääristä ja toimittajista on osittain otosjoukon pienuudesta ja osittain suuresta hajonnasta johtuen vaikea tehdä johtopäätöksiä.

Lannoitteissa ja lannan käytössä on suuria eroja vastausten välillä. Kuitenkin joitain lannoitteita käytetään useammin kuin toisia. Tämä johtuu osittain siitä, että tietyt maaperätyypit ovat vastauksissa yleisempiä kuin toiset. Naudan liete- tai kuivalanta (16/23), sekä Pellon Y3 (9/58) ja Pellon Y6 (6/58) ovat yleisimmät käytetyt lannoitteet kyselytutkimuksen perusteella. Käytössä on useita eri lantatyyppejä, eikä selvästi suosituinta löydetty. Maaperätyypeistä hieta- ja hiesumaa (33/65) sekä multamaa (28/65) ovat yleisimpiä ruokohelpin viljelyalueilla. On kuitenkin huomattava, että vastauksissa mainittiin usein monia maaperätyyppejä vastaajaa kohden.

3.3.2. Viljan olki sekä rypsin ja rapsin korsi

Olki- ja korsibiomassoja syntyy viljan sekä rypsin ja rapsin viljelyn sivutuotteina. Syntyvä olkimäärä voidaan laskea satoindeksin avulla (Harvest Index, HI), joka tarkoittaa korjatun sadon (esim. tässä viljan jyvä) kuiva-aineen suhdetta maanpäälliseen kokonaisbiomassaan. Satoindeksit vaihtelevat viljoilla, ollen alhaisin rukiilla 0,4 ja korkein ohralla 0,55. Laskennassa on käytetty Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskuksen Matilda -tietokannasta saatuja viljasatoja TE-keskuksittain vuodelta 2008. Viljan kosteudeksi on oletettu 14 %. (Pahkala ym., 2009)

Teoreettisesta olkimäärästä kaikkea ei saada korjattua talteen, koska osa jää peltoon sänkenä ja korjuukauden sääolosuhteet voivat estää korjuun. Sängen pituus riippuu maaperän ominaisuuksista, esimerkiksi tasaisella maalla sängen pituus voi olla hyvinkin lyhyt. Sängen pituuden ollessa 15 cm menetetään noin 27 % potentiaalisesta olkisadosta (Pahkala & Kontturi, 2008), jota tässäkin tutkimuksessa on käytetty olkipotentiaalilaskentaan. Teoreettisesta potentiaalista tulisi vähentää myös se määrä, joka tarvitaan maan kasvukunnon ylläpitämiseen. Kasvijätteen jättäminen maahan voi suojata vesi- ja tuulieroosiolta, parantaa maan rakennetta ja veden imeytymistä maahan sekä lisätä maan orgaanista hiiltä ja viljavuutta. Koska maan ominaisuuksien kannalta tarpeellisista maahan jätettävistä määristä ei vielä ole olemassa olevia tutkimustuloksia viljan oljen ja rypsin korren osalta, on tässä oletettu, että kaikki olki ja korsi voidaan korjata hyötykäyttöön. (Pahkala ym., 2009) Olkea käytetään yleensä myös eläinten kuivikkeena, jolloin tätä määrää ei voida käyttää

energiahyötykäyttöön. Kuivikekäytön suuruudeksi on tässä oletettu 20 %, kuten monissa muissakin tutkimuksissa (esim. Mäkinen ym., 2006).

Viljan oljen lämpöarvo vaihtelee eri viljalajien kesken, ollen alhaisin kauran oljella, jonka kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 16,7 MJ/kg, ja korkein vehnän oljella 17,8 MJ/kg. Keskimäärin viljan oljen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 17,4 MJ/kg ja polttokosteus noin 20 %. (Alakangas, 2000) Poltosta saatava energiamäärä lasketaan saapumistilan tehollisen lämpöarvon avulla, joka ottaa huomioon kosteuden höyrystymiseen vaadittavan energian. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan yhtälöllä

$$q_s = q_{ka} \cdot (1 - w) - l \cdot w, \quad (3)$$

missä q_s on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg)

q_{ka} on tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)

w on kosteusprosentti (%)

l on veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä (2,441 MJ/kg).

Taulukossa 6 on esitetty viljan viljelyalat Suomessa TE-keskuksittain sekä näiltä aloilta saatavat olkipotentiaalit ja energiat, joista on vähennetty sängin osuus ja kuivikekäyttöön menevän oljen määrä.

Taulukko 6. Viljan viljelyalat ja niiltä saatavat olkipotentiaalit ja oljesta saatava energia TE-keskuksittain (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009).

TE-keskus	Viljan viljelyala 1000 ha	Olkipotentiaali 1000 t _{ka} /a	Energia TJ/a
Uusimaa	121	224	3 783
Varsinais-Suomi	206	390	6 569
Satakunta	93	173	2 869
Häme	120	219	3 654
Pirkanmaa	92	151	2 492
Kaakkois-Suomi	78	137	2 274
Etelä-Savo	23	34	556
Pohjois-Savo	44	57	954
Pohjois-Karjala	27	39	646
Keski-Suomi	34	45	737
Etelä-Pohjanmaa	136	241	3 989
Pohjanmaa	110	191	3 182
Pohjois-Pohjanmaa	87	96	1 585
Kainuu	4	4	71
Lappi	2	2	31
Ahvenanmaa	5	11	180
Koko Suomi	1 180	2 010	33 570

Viljan oljen ja puun alkuainesisältö ja tehollinen lämpöarvo ovat hyvin samanlaiset. Molemmat sisältävät myös paljon haihtuvia aineita ja palavat tämän vuoksi pitkällä valaisevalla liekillä ja vaativat palotilaksi laajan tulipesän. Oljen tuhkan kalsium-, magnesium- ja kaliumpitoisuudet ovat korkeat, jonka ansiosta saadaan esimerkiksi turpeen kanssa poltettaessa syntyvä rikki sitoutumaan tuhkaan. (Alakangas, 2000)

Viljan oljen polton ongelmaksi muodostuvat oljen suuri tuhka- sekä kloori- ja alkalipitoisuus. Lisäksi eri viljalajien olkien tuhkan sulamislämpötilat vaihtelevat huomattavasti, jonka vuoksi kattilan arinan pitäisi toimia sekä sulalla että sulamattomalla tuhalla. Myös tuhkanpoistolaitteiden pitäisi pystyä käsittelemään sekä sulamisen jälkeen uudelleen jähmettynyttä että sulamatta jäänyttä tuhkaa. Oljen tuhkan ominaisuudet vaihtelevat viljalajin, kasvupaikan ja lannoituksen mukaan. Kauran oljen lämpöarvo on alhaisin ja sulamisominaisuudet ovat huonommat kuin muilla viljalajeilla. Vehnän oljessa puolestaan on eniten tuhkaa. Kemialliseen koostumukseen vaikuttavat kasvilajin lisäksi kasvin ikä ja viljelyolosuhteet. Sadonkorjuun ajankohta vaikuttaa myös biomassan koostumukseen siten, että oljen kloori- ja alkalipitoisuudet laskevat, jos sen annetaan olla pellolla sateen huuhtottavana. Kloori ja alkali ovat ongelmallisia, koska ne muodostavat kemiallisen reaktion kautta natrium- ja kaliumkloridia savukaasuihin, jotka aiheuttavat korroosiota erityisesti korkeissa lämpötiloissa. (Alakangas, 2000)

Edellä mainittujen tekijöiden vuoksi oljen poltto onnistuu parhaiten oljen polttoon suunnitellulla kattilalla, joita on käytössä Tanskassa maatilakokoluokasta aina suuren mittakaavan energiantuotantoon. (The Centre of Biomass Technology, 1998) Myös Suomessa on saatavissa tanskalaisia oljen polttoon suunniteltuja maatilakokoluokan sekä useamman tilan yhteiskäyttöön soveltuvia kattiloita. Faust olkikattilat ovat kokoluokaltaan 150-600 kW ja Reka monitoimikattilat ovat 10-6500 kW. Molemmissa kattiloissa voidaan polttaa oljen lisäksi myös muita kosteita biopolttoaineita. (Bio Help Oy, 2009, Kardonar, 2009) Poltettaessa olkea seospolttoaineena suurilla voimalaitoksilla, voidaan sopivana olkimääränä pitää viittä prosenttia kokonaisenergiasta (Flyktman & Paappanen, 2005).

Taulukossa 7 on esitetty rypsin ja rapsin korsipotentiali TE-keskuksittain. Korren määrä on laskettu satoindeksin avulla, kuten viljan olki. Tilastoidun sadon kosteudeksi on oletettu 9 % ja satoindeksiksi 0,35. (Pahkala ym., 2009) Myös rypsin ja rapsin korsipotentialin laskennassa oletetaan, että peltoon jää sänkeä 15 cm. Korren osalta oletetaan, että sitä ei käytetä kuivikekäyttöön ja kaikki korsi voidaan kerätä ilman, että sillä on vaikutusta maaperän ominaisuuksiin. Rypsin korren tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 18,5 MJ/kg ja polttokosteus 25 %, jota käytetään myös rapsin korren energiamäärän laskennassa (Alakangas, 2000).

Rypsin ja rapsin korren käyttäytymisestä poltettaessa ei ole olemassa tutkittua tietoa. Korren voidaan kuitenkin olettaa käyttäytyvän muuten hyvin samalla tavalla viljan oljen kanssa, mutta niiden tuhka- ja klooripitoisuudet ovat pienemmät kuin oljella. Rypsin ja rapsin korsi voidaan kuitenkin olettaa poltettavan samoissa kattiloissa ja laitoksissa oljen kanssa, jolloin korren osuus poltettavasta materiaalista tulisi olemaan hyvin pieni (alle 5 %), joten sen ominaisuudet eivät juuri vaikuta polttotapahtumaan ja päästöihin.

Taulukko 7. Rypsin ja rapsin korsipotentiaali Suomessa ja korresta saatava energia TE-keskuksittain (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus, 2009).

TE-keskus	Rypsin ja rapsin viljelyala 1000 ha	Korsipotentiaali 1000 t _{ka} /a	Energia TJ/a
Uusimaa	10,4	18,2	322
Varsinais-Suomi	15,7	27,5	486
Satakunta	2,9	5,6	99
Häme	7,7	16,1	284
Pirkanmaa	5,6	8,8	156
Kaakkois-Suomi	5,5	9,9	175
Etelä-Savo	0,4	0,6	10
Pohjois-Savo	0,9	1,1	20
Pohjois-Karjala	0,7	0,7	13
Keski-Suomi	1,1	1,6	29
Etelä-Pohjanmaa	6,8	10,0	177
Pohjanmaa	4,2	7,1	126
Pohjois-Pohjanmaa	1,4	1,3	24
Kainuu	0,1	0,1	1
Lappi	-	-	-
Ahvenanmaa	0,3	0,9	16
Koko Suomi	60	110	1 940

Olkea ja kortta voidaan polttaa samoissa voimalaitoksissa ruokohelpin kanssa, joiden tekninen käyttöpotentiaali ruokohelpin poltolle on tällä hetkellä noin 4,3 TWh/a (ks. kpl 3.3.1). Oljen ja korren vuotuinen potentiaali puolestaan on noin 9,8 TWh, joka tarkoittaa, että tällä hetkellä Suomessa ei ole riittävää voimalaitoskapasiteettia käyttämään kaikkea tarjolla olevaa olkea ja kortta.

Viljan oljen ja rypsin korren korjuusta ja kuljetuksista ei juurikaan ole saatavilla tutkimustietoa Suomen osalta. Näiden voidaan kuitenkin olettaa olevan hyvin samankaltaiset ruokohelpin kanssa. Ruokohelpin korjuuta, kuljetuksia ja niistä aiheutuvia kustannuksia on tutkittu Suomessa (esim. Lindh ym., 2008, Lankoski & Ollikainen, 2006). Tanskalaisilla puolestaan on jo pitkän ajan kokemuksia viljan oljen korjuusta ja kuljetuksista.

Olki ja korsi voidaan kerätä ja kuljettaa paaleina, irtotavarana tai silppuroituna. Suomessa käytössä olevat paalityypit ovat kova-, pyörö- ja suurkanttipaalit. Pyöröpaalit voivat olla halkaisijaltaan jopa 180 cm. Paalien leveys on joko 120 tai 150 cm. Oljesta paalatun pyöröpaalin tiheys on alle 120 kg/m³. Suurkanttipaalit ovat suorakaiteen muotoisia ja niiden leveys ja korkeus riippuvat paalaimen merkistä ja mallista. Paalin pituus voi olla 120-250 cm. Kovapaalit ovat myös suorakaiteen muotoisia, mutta huomattavasti pienempiä kuin suurkanttipaalit. Kovapaalien leveys on 35-50 cm, korkeus 30-45 cm ja pituus 80-120 cm. (Salo, 2000)

Tanskassa oljesta paalatut pyöröpaalit ovat tyypillisimmin halkaisijaltaan 150 cm ja leveydeltään 120 cm. Ne painavat noin 244 kg ja tiheys on keskimäärin 110 kg/m³. Suurpaalit ovat 120 cm leveitä, 130 cm korkeita ja 240 cm pitkiä. Ne painavat noin 523 kg ja tiheys on keskimäärin 139 kg/m³. Tanskassa voidaan tehdä myös

tiheydeltään 170 kg/m^3 olevia suurpaaleja, jos olki silputaan ennen paalausta. Silppuroidun oljen tiheys irtokuljetuksessa on ainoastaan $45\text{-}50 \text{ kg/m}^3$. (The Centre of Biomass Technology, 1998)

Paappasen ym. (2008) tutkimuksissa saatiin ruokohelpin paalauskoikeissa suurimmaksi ruokohelpin tiheydeksi kantipaalamella 201 kg/m^3 . Pyöröpaalamilla päästiin $166\text{-}182 \text{ kg/m}^3$ tiheyksiin. Ruokohelpi on kuitenkin hieman helpommin tiivistyvää kuin olki. Olkipaalien tiheyden voidaankin olettaa vastaavan tanskalaisten olkipaalien tiheyttä. Rypsin korsipaalien tiheyksistä ei ole tutkimustietoa, joten sen oletetaan noudattavan olkipaalien tiheyttä. Rypsin ja rapsin korsi muodostaa alle 5 % olki- ja korsibiomassoista, joten korsipaalien tiheydellä ei ole suurta vaikutusta lopputuloksen kannalta.

Ruokohelpin, oljen ja rypsin korren kuljetuksissa voidaan olettaa käytettävän kuorma-autoa, jonka nuppiosan kuormatilan pituus on 6,8 metriä ja perävaunun 11,2 metriä. Kuormatilan leveys puolestaan on 2,4 metriä ja korkeus 2,95 metriä. Tämän kokoiseen kuorma-autoon voitaisiin lastata 52-56 kappaletta pyöröpaaleja, joiden halkaisija on 1,2 metriä, 40-44 kappaletta pyöröpaaleja, joiden halkaisija on 1,5 metriä, tai 42-56 kappaletta suurkantipaaleja, riippuen paalien pituudesta. Orkelpaalamella, joka silppuaa oljen ennen paalausta, tehtyjä paaleja mahtuu yhteen kuormaan 92 kappaletta. (Paappanen ym., 2008) Taulukossa 10 on vertailtu ruokohelpin sekä oljen ja korren kuljetusten massoja ja energiasisältöjä. Silppuroinnin osalta on kuitenkin huomioitava, että se vaatii enemmän tehoja ja kuluttaa samalla enemmän energiaa kuin perinteinen paalaus, joten se ei välttämättä ole kovin kannattavaa. Myös pyöröpaalien käyttöä voidaan pitää logistisesti ja taloudellisesti hyvin tehottomana ja samalla myös kannattamattomana.

Taulukko 8. Oljen ja korren sekä ruokohelpin kuljetukset täysperävaunuyhdistelmällä.

	Ruokohelpi		Olki ja korsi	
	Massa, t/kuorma	Energia, GJ/kuorma	Massa, t/kuorma	Energia, GJ/kuorma
Pyöröpaali, 1,2 m	13	190	10	135
Pyöröpaali, 1,5 m	15	220	13	170
Suurkanttipaali, 0,7 m	21	310	20	260
Suurkanttipaali, 0,9 m	20	300	19	250
Orkel-paalaimen paali	28	410	23	300

4. YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN INVENTOINTI

4.1. Tietolähteet

4.1.1. Viljely

Ruokohelpeä lukuun ottamatta on viljelylohkojen kasvikohtaiset yksikköpanokset ja tuotokset, mukaan lukien päästöt, muodostettu Pro Agrian lohkotietokannan lähtötiedoista vuosilta 2002-2006. Ruokohelpin tiedot on kerätty viljelijäkyselyllä. Huuhtoumien arviointiin on käytetty MTT:n ja Suomen ympäristökeskuksen yhteistyössä kehittämiä mallien (Virtanen ym.) päivitettyjä versioita, joiden muuttujina ovat mm. ravinnetaseet ja maan fosforipitoisuus. Kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa on käytetty IPCC:n laskentamalleja ja ammoniakkipäästöjen arvioinnissa EEA:n malleja.

Lannoitteiden valmistuksen tiedot on saatu Yaralta. Tiedot on koottu Yaran Uudenkaupungin tehtaalta vuodelta 2008 (Bertrupp, 2009) ja niitä on täydennetty EFMAN (Euroopan lannoiteteollisuuden liiton) tiedoilla. Lannoitteiden on oletettu olevan Y-lannoitteita. Yaran tiedoista on kuhunkin viljelykasviin valittu sellainen lannoite, joka vastaa N-P-K-suhteita lohkotietopankin aineistosta. Kalkin louhinnan, valmistuksen ja kuljetusten osalta on käytetty Nordkalkilta saatuja tietoja (Welin, 2008). Kalsiumkarbonaattiekvivalentit, joilla lasketaan levitetystä kalkista vapautuvan hiilidioksidin määrä, on laskettu karbonaatteja sisältäville kalkitusaineille kokonaisneutralointikyvystä suhteessa kalsiittiin. Kalkitusmäärissä on tapahtunut viime vuosina radikaali lasku, joka ei kuitenkaan täysin näy tässä tutkimuksessa käytetyissä malleissa, koska aineisto on vuosilta 2002-2006. Myös erilaisten, teollisuuden sivuvirroista valmistettujen, karbonaatteja sisältämättömien neutralointiaineiden käyttö on kasvanut viime vuosina suhteellisen nopeasti. Tämäkään kehitys ei näy täysin viljelyprosessien malleissa edellä mainitusta syystä.

Työkoneiden polttoaineen kulutukset on laskettu MTT:n tuoreimmalla traktorityömallilla, joka on kehitetty Nebraskan yliopistossa kehitetyn mallin pohjalta (Grisso ym., 2007) ja kasvihuonepäästökertoimet polttoaineen käytöstä on laskettu erilaisille moottorimalleille VTT:n LIISA-mallista sekä vertailtu tai osin rakennettu MTT Teknologiatutkimuksen Vakolan tietoihin perustuen. Maatalouskoneiden polttoaineen polton ja tuotannon kasvihuonekaasupäästökertoimet saatiin Neste Oililta.

Bioetanolin valmistukseen käytettävien raaka-aineiden ympäristövaikutusten arvioinnissa käytetyt lähtötiedot on esitetty taulukossa 9. Taulukossa 10 on esitetty biodieselin valmistuksessa käytettävän rypsin vastaavat lähtötiedot.

Taulukko 9. Bioetanolin valmistukseen käytettävien raaka-aineiden viljelyn lähtötiedot (Pro Agrian lohkotietopankki).

	Vehnä	Ohra	Sokerijuurikas	Peruna
Satotaso, kg/ha	4 090	3 769	36 300	25 600
Kalkki, kg/ha	685	685	673	673
Typpi, kg/ha	134	99	128	69
Fosfori, kg/ha	14	17	26	28,5
Kalium, kg/ha	26	39	47	114
Siemenet, kg/ha	274	269	3,3	3 250

Taulukko 10. Rypsin viljelyn lähtötiedot (Pro Agrian lohkotietopankki).

	Rypsi
Satotaso, kg/ha	1 416
Kalkki, kg/ha	346,6
Typpi, kg/ha	109,5
Fosfori, kg/ha	13,8
Kalium, kg/ha	25,4
Siemenet, kg/ha	8,3

Ruokohelpi

Ruokohelpin viljelyn lähtöarvoina käytettiin kyselytutkimuksessa saatuja arvoja. Tutkimus toteutettiin postitse lähetettynä kyselynä Vapon sopimustuottajille, jotka ovat antaneet luvan osoitetietojensa käyttämiseen. Taulukossa 11 on esitetty kyselytutkimuksessa saadut keskiarvotulokset. Tulosten analysoinnissa keskityttiin niihin viljelijöihin, joiden vastausten perusteella voitiin laskea myös saatu satotaso. Kuljetusmatkojen kilometrimäärät on ratkaistu Eniron karttapalvelun avulla (ks. <http://kartat.eniro.fi>), vastaajien ja polttolaitosten osoitteiden perusteella.

Taulukko 11. Ruokohelpin viljelyä koskeneen kyselytutkimuksen tulokset, huomioiden lohkoittaiset vastaukset.

Määrällinen suure	Keskiarvo	Otosjoukko
Satotaso, kg kuiva-ainetta/ha	4010	69
Fosforia, kg/ha	12,59	85
Typeä, kg/ha	55,0	91
Kalkkia, kg/ha	5417	18
P-luku/ha	6,28	47
N huuhtouma, kg/ha	4,37	48
Polttoaineen kulutus, l/ha	23,17	27
Kuljetusmatka, km	72,98	39

Kyselytutkimuksen tietojen lisäksi fosforihuuhtoumalle käytettiin viljojen keskimääräistä fosforihuuhtoumaa, joka on 0,66 kg/ha.

Kyselytutkimuksessa saatuja tietoja voidaan tarkastella myös ruokohelpilohkojen perustamisvuoden mukaan. Tällöin saadaan selville lohkoilla tehdyt toimenpiteet ja saadut sadot viljelyksien iän perusteella. Nämä tiedot on annettu taulukossa 12.

Taulukko 12. Ruokohelpin viljelyä koskeneesta kyselytutkimuksesta saadut lohkokohdaiset luvut eri ikäisille ruokohelpiviljelmille.

Määrällinen suure	1. vuosi (perustaminen)		2. vuosi (sato korjattu 3. vuonna)		3.-n. vuosi	
	ka.	Otosjoukko	ka.	Otosjoukko	ka.	Otosjoukko
Satotaso, kg/ha	0,0	-	3328,8	9	3952,1	19
P, kg/ha	14,7	71	11,4	78	14,0	46
N, kg/ha	50,6	83	51,9	89	49,7	50

Tarkasteltaessa kirjallisuutta huomataan, että satotaso vaihtelee 3 000-7 000 kg kuiva-ainetta vuodessa (Pahkala ym., 2005), jolloin saatu satotaso on vaihteluvälin sisällä. Flyktman & Paappanen (2005) esittää keskimääräiseksi ruokohelpin satotasoksi 4 500 kg kuiva-ainetta hehtaaria kohti, mutta myös suuremmat sadot ovat mahdollisia (Paappanen ym., 2008).

Ruokohelpiviljelmät entisillä turvetuotantoalueilla

Turvetuotannosta poistetuilla alueilla sijaitsevista ruokohelpiviljelmistä saatiin tietoja Vapo Oy:ltä viiden viljelylohkon osalta (yhteenlaskettu pinta-ala n. 46 ha). Näillä alueilla ruokohelpiviljelmien perustamisvaiheessa pellot oli sarkaojitettu 20 m ojavälillä, kentät tasattu ja mahdolliset kivet poistettu. Kylvöalusta oli kalkittu perustamisvaiheessa (8 000-10 000 kg/ha) ja kylvömuokkaus tehty lapiorullaäkeellä. Varsinainen kylvö oli tehty tavanomaisella kylvöannoittimella, jossa oli piensiemenen kylvömahdollisuus. Siemeniä oli käytetty n. 15 kg/ha (lajike: Palaton). Kylvön ajankohta oli ollut kesäkuun 20. päivän jälkeen. Työkoneiden polttoaineenkulutukseksi (sisältäen kaikki työt) arvioitiin noin 23 litraa/ha/vuosi. Taulukossa 13 on esitetty Vapolta saadut tiedot jaoteltuna ruokohelpilohkojen perustamisvuoden mukaan. Lohkoista kaksi oli perustettu vuonna 2002, yksi vuonna 2003 ja kaksi vuonna 2005.

Taulukko 13. Keskimääräiset satotasot, lannoitusmäärät, maan P-luvut ja kuljetusmatkat eri-ikäisille ruokohelpiviljelmille entisillä turvetuotantoalueilla.

Määrällinen suure	1. vuosi (perustaminen) otosjoukko: 5 lohkoa	2. vuosi (sato korjattu 3. vuonna) otosjoukko: 5 lohkoa	3.-6. vuosi otosjoukko: 3-5 lohkoa
Satotaso, kg/ha	-	3480	3530
P, kg/ha	27,0	17,9	13,4
N, kg/ha	50,5	76,3	57,5
Kalkitus, kg/ha	8750	-	-
P-luku /ha	4,81	4,83	4,77
Kuljetusmatka polttolaitokselle, km	-	69,0	55,7

Turvetuotannosta poistetuilla alueilla sijaitsevista ruokohelpiviljelmistä saatujen tietojen pieni otosjoukko rajoittaa mahdollisuuksia yksityiskohtaiseen kvalitatiiviseen vertailuun tavanomaisilla pelloilla tapahtuvan ruokohelpin viljelyn kanssa.

Typpihuuhtoumat entisillä turvetuotantoalueilla sijaitsevilta ruokohelpiviljelmiltä arvioitiin samoin kuin peltomaaviljelyn osalta, eli laskennallisesti viljelmän typpitaseen avulla. Fosforihuuhtouma-arviona käytettiin viljapelloille laskettua

keskimääräistä fosforihuuhtouma-arvoa. Kokonaistyyppi- fosforihuuhtoumat muunnettiin rehevöittäviksi päästöiksi Suomen ympäristökeskuksen Jyri Seppälän Mittatikkuhankkeessa kehittämien kertoimien avulla. Viljelmien typpioksiduulipäästöt arvioitiin typpilannoitemäärien perusteella IPCC:n laskentaohjeistuksen mukaisesti (IPCC, 2006).

Viljan olki sekä rypsin ja rapsin korsi

Oljelle ja korrelle viljelyn päästöjä ei ole otettu laskelmissa huomioon, koska niiden oletetaan syntyvän muun viljelyn sivutuotteena, jolloin viljelyn aiheuttamat päästöt on allokoitu päätuotteelle.

4.1.2. Polttoaineen tuotanto

Bioetanoli

Energiankulutustiedot sekä sivuvirtaprosessit perustuvat osin kirjallisuustietoihin bioetanolin tuotannosta ulkomailla, bioetanolin valmistussuunnitelmiin kotimaassa (mm. Suomen Bioetanoli Oy, Hämeenlinnan ammattikorkeakoulu, Sucros Oy), osin asiantuntijahaastatteluihin (mm. Enwald, 2009), osin toimiviin laitoksiin Suomessa (Shaman's Spirits Oy, ST1:n laitokset) ja Ruotsissa (Lantmännen Agroetanol) ja osin laboratoriomittakaavassa tehtyihin kokeisiin (Liimatainen, 2004). Laitoskooksi on oletettu 50 000 tonnia etanolia vuodessa, koska useassa aikaisemmassa etanolin tuotantosuunnitelmassa tätä on käytetty laitostokona.

Tässä tutkimuksessa lämpöenergian lähteeksi on oletettu maakaasu, vaikka suomalaisista laitoksista ainakin Punkaharjulle ja Saloon suunnitelluille laitoksille (Salon laitoksen suunnittelusta on kuitenkin jo luovuttu) on kaavailtu käytettäväksi puuenergiapitoisia energianlähteitä. Käytettäessä puupitoisia raaka-aineita etanolin valmistusprosessin kasvihuonekaasukuormitukset pienenevät.

Tässä tutkimuksessa oletuksina on, että mäsikäsvaiheessa käytetään entsyymattista hydrolyysiä, fermentoinnissa seoksen etanolipitoisuus on tislaukseen johdattaessa 10 %, tislaukset tapahtuu kaksivaiheisesti ja rankkia käytetään joko märkärehuna (skenaario 1) tai siitä tehdään biokaasua (skenaario 2). Lisäksi lasketaan myös skenaario, jossa rankkia ei hyötykäytetä, vaan kaikki kuormitukset allokoitetaan päätuotteelle. Sokerijuurikasraaka-aineesta saatu puristeleike käytetään nautakarjan rehuksi. Biokaasua on arvioitu Hämeenlinnan ammattikorkeakoulun selvityksessä syntyvän 0,69 kg/kg rankin sisältämää kuiva-ainetta tai 572 m³/t rankin kuiva-ainetta ja tätä arviota on käytetty myös tämän tutkimuksen laskelmiin. Biokaasun metaanipitoisuudeksi on arvioitu 25 %, jonka pohjalta on tehty rankin biokaasutukseen perustuvat laskelmat.

Energiankulutustietojen pohjana on tässä tutkimuksessa käytetty Lantmännen Agroetanolin tietoja (Bernesson ym., 2006), jotka ovat lämmön kulutukselle 10 630 MJ/t etanolia ja sähkön kulutukselle 428 kWh/t. Tässä tutkimuksessa ei prosessiin sisällytetty rankin kuivausta, joten kyseisistä luvuista on vähennetty rankin kuivaukseen käytettävä energia. Tässä tutkimuksessa käytetyt energiamäärät ovat siis 5 590 MJ lämpöä ja 217 kWh sähköä etanolitonni kohden. Arvot perustuvat

laitokseen, joka käyttää vehnää raaka-aineenaan. Ohran perunan ja sokerijuurikkaan prosessoinnin energiankulutus on laskettu tässä tutkimuksessa samoilla arvoilla, koska fermentoinnin ja tislauksen energiankulutus on sama raaka-aineesta riippumatta.

Raaka-aineen tarpeeksi on laskettu vehnää käsittelevälle laitokselle 3 356 kg vehnää/t etanolia (www.agroetanol.se), ohraa käsittelevälle laitokselle 3 840 kg ohraa/t etanolia, 40 % sokerijuurikasta käsittelevälle laitokselle 3 150 kg ohraa/t etanolia sekä 2 120 kg sokerijuurikasta/t etanolia (Kymäläinen, 2007) ja 60 % sokerijuurikasta käsittelevälle laitokselle 2 340 kg ohraa/t etanolia sekä 4 690 kg sokerijuurikasta/t etanolia. Perunan raaka-ainetarpeen laskettiin olevan 8 500 kg perunaa/t etanolia.

Käytetyissä entsyymi- ja kemikaalimäärissä lähteenä on ollut Bernesson (2004), mutta Suomen Bioetanolin YVA-selvityksessä (Jaakko Pöyry 2006) käytetyt kemikaalimäärät ovat yleisesti ottaen selvästi suurempia. Tästä voidaan päätellä, että kemikaalien käyttömäärät voivat vaihdella suuresti laitoksittain. Sivutuotteena syntyvän rankin määränä vehnäperäisessä laitoksessa käytettiin Lantmännen Agroetanolin 0,85 kg/l etanolia 90 %:n kuiva-ainepitoisuudessa (www.agroetanol.se) eli kuiva-aineena 0,97 kg/kg. Ohrapohjaisen etanolin tapauksessa arvioitiin rankkia syntyvän kuiva-aineena 1,0 kg/kg etanolia, perunapohjaisen etanolin tapauksessa 1,1 kg/kg etanolia ja sokerijuurikasta 40 % raaka-aineena käyttävässä laitoksessa 1,3 kg/kg etanolia.

Pienen kokoluokan biodiesel-tuotanto

Pienen kokoluokan rypsipohjaisen biodieselituotannon tutkimus toteutettiin haastattelu/kyselytutkimuksena. Biodieselituottajiin otettiin yhteyttä ja heitä pyydyttiin täyttämään tutkimusta varten kyselylomake. Lomakkeen täyttämisen jälkeen tietoja tarkennettiin tarpeen mukaan vielä puhelimitse. Yhdelle tuotantopaikalle tehtiin vierailu ja tuottajaa haastateltiin samalla henkilökohtaisesti. Haastattelut/kyselyt suoritettiin 21.9.2007-24.4.2008. Tutkimuksessa ei etukäteen määritelty kokoluokkaa tarkemmin, mutta kaikkien laitosten biodieselin vuosituotanto jäi alle 50 000 litran.

Tutkimuskohteena olivat rypsiä/rapsista biodieseliä esteröimällä valmistavat pienen kokoluokan laitokset. Tällaisia laitoksia löydettiin tutkimuksen aikana Suomesta viisi kappaletta, ja näiden kaikkien tuotantotiedot ovat tutkimuksessa mukana. Laitoksia etsittiin internetistä sekä tiedustelemalla alan toimijoilta. Kaikki toimijat puristavat ja esteröivät rypsiöljyn biodieseliksi itse.

Tuottajilta kysyttiin tuotantolaitoksen panos-tuotos -tietoja vuonna 2006. Yhden laitoksen osalta päädyttiin käyttämään vuoden 2007 tietoja, koska laitos ei ollut toiminnassa vielä vuonna 2006. Panoksista kysyttiin rypsiensiemenen kulutusta, kemikaalien kulutusta, veden kulutusta sekä energian käyttöä. Tuotoksista selvitettiin tuotetun rypsiöljyn määrä, esteröintiin käytetyn rypsiöljyn määrä sekä tuotetun biodieselin määrä. Lisäksi kysyttiin sivutuoteglyserolin, puristekakun ja jäteveden määriä.

Panos-tuotos -tietojen lisäksi tutkimuksella pyrittiin selvittämään sekä rehujakeiden että muiden sivutuotteiden hyötykäyttökohteita ja jättemateriaalien hävittämistapoja. Yritysten antamat tiedot perustuvat pääasiassa yritysten omaan kirjanpitoon ja omiin

arvioihin. Panoksista ja tuotoksista ei tehty kemiallisia analyysyjä. Laskelmia tehdessä on käytetty taulukossa 14 esitettyjä oletuksia.

Taulukko 14. Biodiesellaskelmissa käytetyt tiheydet.

Rypsiöljyn tiheys	0,924 kg/l
Biodieselin tiheys	0,880 kg/l
Glyserolin tiheys	1,261 kg/l
Metanolin tiheys	0,787 kg/l

Energiankulutukset jouduttiin pääosin arvioimaan, koska erillisiä mittauksia ei ollut käytössä. Sähkönkulutukset arvioitiin laitteiden käyttöaikojen perusteella sekä arvioimalla niiden ottotehot. Esteröinnin lämmönkulutus arvioitiin vastaavasti prosessin lämpötarpeen perusteella.

Energiantuotannon päästöjen arviointiin käytettiin MTT:llä sekä kirjallisuustiedon että asiantuntija-arvioiden pohjalta koostettuja arvioita Suomen sähköntuotannon päästöistä sekä pienten lämmöntuotantokattiloiden päästöistä. Metanolin ja lipeän tuotannon päästöt perustuvat kirjallisuusarvioihin (Bernesson, 2004).

Kyselytutkimuksen mukaan vain noin 12 % tuotetusta biodieselistä käytetään ajoneuvoissa (ks. taulukko 29 luvussa 5.1.2.). Yleisimmät käyttökohteet ovat lämmitys ja työkonet. Nämä käyttökohteet on kuitenkin tässä tutkimuksessa rajattu pois. Samoin tutkimuksessa on oletettu, että rypsin viljelyn konetyö tehdään perinteisesti mineraalipohjaisella diesel-polttoaineella eikä biodieselillä.

NExBTL:n tuotanto

NExBTL:n tuotantotiedot perustuvat Nikanderin (2007) laatimaan energia- ja kasviuonekaasutaseeseen, jossa tuotanto tapahtuu Neste Oilin jalostamolla Porvoon Kilpilahdessa. Prosessi sisältää esikäsitteilyn ja vetykäsitteilyn. Vetykäsitteilyssä syntyy sivutuotteena propaania, biopolttoainetta ja vettä. Polttoaineet käytetään hyväksi laitoksen höyryn tuotannossa. Itse polttoaineen käsitteilyn lisäksi vedyn tuotanto vaatii paljon energiaa. NExBTL:n raaka-aineena käytettävä rypsiöljy tehdään Raision tuotantolaitoksella ja rypsiöljyn tuotantotiedot perustuvat Raision tietoihin.

4.1.3. Kuljetukset

Kuljetusten päästöt on arvioitu VTT:n LIPASTO-tietokannan avulla, jossa ajoneuvojen päästöt on annettu täydellä kuormalla (40 t), 70 %:n kuormalla (28 t) sekä tyhjälle autolle. Tonnikilometripäästöt määritetään seuraavan yhtälön avulla (LIPASTO, 2002):

$$e_a = \frac{e_e + \left(\frac{e_f - e_e}{l_c} \cdot l_a \right)}{l_a}, \quad (4)$$

missä e_a on päästö tonnikipometriä kohden kuormalla a (g/tkm)

e_f on täyden auton päästö ajoneuvokilometriä kohden (g/km)

e_e on tyhjän auton päästö ajoneuvokilometriä kohden (g/km)

l_c on auton kantavuus (t)

l_a on kuorma (t).

Bioetanoli

Tässä tutkimuksessa on oletettu bioetanolin valmistukseen käytettävän ohran ja vehnän kuljetusmatkaksi 113 km ja perunan ja sokerijuurikkaan 100 km. Lannoitteiden kuljetusmatkaksi on oletettu 300 km ja kalkin 200 km. Bioetanolin jakelua ei tutkimuksessa ole huomioitu.

Biodiesel

Maatilakokoluokan biodiesel-tuotannossa kuljetustarve oletetaan kaiken kaikkiaan hyvin pieneksi. Lannoitteiden kuljetusmatkaksi oletetaan 300 km ja kalkin 200 km. Rypsin viljelyn oletetaan tapahtuvan omalla tilalla tai lähialueella. Rypsilille oletetaan keskimääräiseksi kuljetusmatkaksi 20 km traktorilla. Metanolin ja lipeän kuljetusmatkoiksi oletetaan 300 km.

NExBTL:n tuotantoketjussa lannoitteiden ja kalkin kuljetusmatkat ovat samat kuin maatilakokoluokan tapauksessa. Rypsin kuljetusmatkaksi on arvioitu keskimäärin 62 km viljelypaikalta Raision tuotantolaitokselle. Raisiolla tuotettu rypsiöljy kuljetetaan Kilpilahteen NExBTL-laitokselle, jolloin kuljetusmatka on 215 km.

Biodieselin jakelua ei tutkimuksessa ole huomioitu. Pienen mittakaavan biodieseltuotannon käyttö tapahtuu pääasiassa tuotantopaikan lähialueilla.

Ruokohelpi, olki ja korsu

Lindhin ym. (2008) mukaan ruokohelpin viljely voi olla kannattavaa vain, jos ruokohelpi kuljetetaan alle 120 kilometrin päästä, siinä tapauksessa, että ruokohelpi paalataan ja murskataan voimalaitoksen kiinteällä murskaimella. Kyselytutkimuksen (luvut 3.3.1 ja 4.3.1) tulosten perusteella keskimääräiseksi kuljetusmatkaksi voitaisiin kuitenkin olettaa noin 70 kilometriä, joka olisi myös taloudellisesti ajatellen kannattavampi kuljetusmatka. Tässä on kuitenkin huomioitava, että kyselytutkimuksessa saatu keskimääräinen kuljetusmatka on laskettu kaikkien vastanneiden kuljetusmatkojen keskiarvona, eikä sitä ole painotettu ruokohelpin määrällä, jolloin keskimääräinen kuljetusmatka voi todellisuudessa olla tätäkin lyhyempi.

Oljen ja korren taloudellisesti kannattavaa kuljetusmatkaa ei voida suoraan johtaa ruokohelpin kuljetusmatkoista, koska ruokohelpin hinta on olkea alhaisempi, sillä ruokohelpin viljelijä saa maksun maataloustukien muodossa. Pitkillä kuljetusmatkoilla oljen hinta nousee korkeammaksi kuin laitoksen vaihtoehtoiset polttoaineet, esimerkiksi turve. Jos turpeen hinta voimalaitokselle on 9 €/MWh, ei oljen hinta saisi ylittää tätä tai sen käyttö ei ole laitokselle enää kannattavaa. Oljen korjuun kustannuksiksi voidaan arvioida 5-7 €/MWh, jolloin kuljetusmatka ei voi olla enää kovin pitkä. (Aro-Heinilä, 2009) Kuljetusten kustannus saisi siis olla 2-4 €/MWh. Paappasen ym. (2008) mukaan tämä tarkoittaisi ruokohelpipyöröpaaleille

maksimissaan 50 kilometrin matkaa ja kanttipaaleille alle 100 kilometrin matkaa. Olkipaalin energiasisältö on ruokohelpipaalia pienempi, jolloin oljen kohdalla kannattava kuljetusmatka olisi vielä lyhyempi. Taloudellisesti kannattavaksi kuljetusmatkaksi voidaan siis arvioida pyöröpaaleille 40 kilometriä ja suurkanttipaaleille 80 kilometriä. Pyöröpaalit ovat kuitenkin logistisesti ja taloudellisesti tehottomia, jonka vuoksi tässä tutkimuksessa oletetaan käytettävän vain suurkanttipaaleja.

4.1.4. Polttoaineen käyttö

Bioetanoli ja biodiesel

Bioetanolia ja biodieseliä voidaan käyttää liikennepolttoaineena sekä puhtaana että sekoitettuna bensiiniin ja dieseliin erilaisin seossuhtein. Liikennekäytössä oleellista on tarkastella käytön ympäristövaikutuksia ajosuoritetta kohden eli sekä päästöt että moottorista saatavat tehot on huomioitava.

Bioetanolin ja biodieselin käytön vaikutuksista moottoritehoihin sekä käytöstä syntyviin päästöihin verrattuna seostamattomiin fossiilisiin polttoaineisiin on julkaistu lukuisia tutkimuksia. Tutkimusten tulokset vaihtelevat kuitenkin huomattavasti. Suuriin vaihteluihin voivat olla syinä testeissä käytetyt hyvin erilaiset moottorityypit ja koeolosuhteet, mutta myös erot biopolttoaineiden lähderaaka-aineissa ja laaduissa sekä mittausmenetelmissä ja -tekniikoissa. Monien tekijöiden suhteen on havaittavissa vallitseva vaikutuksen suunta, joskin kaikkien tekijöiden suhteen löytyy myös päinvastaisia tuloksia verrattuna vallitsevaan trendiin. Pitkän aikavälin vaikutuksia moottorin suorituskykyyn ja kestävyys ei juuri ole tutkittu. Seuraavassa on esitetty joidenkin viimeaikaisten review-artikkeleiden (EPA, 2002, Karman, 2003, Smokers & Smit, 2004, Hansen ym., 2005, McCormick ym., 2006, Kousoulidou ym., 2008, Lapuerta ym., 2008) pohjalta kvalitatiivisia arvioita bioetanolin ja biodieselin käytön vaikutuksista.

Etanoliseoksia käytettäessä hiukkas- ja kokonaishiilidioksidipäästöjen on havaittu jonkin verran pienenevän verrattuna tavanomaisten polttoaineiden käyttöön. Hiilidioksidipäästöjen osalta on kuitenkin huomioitava, että vain pieni osa bioetanolin poltossa syntyvistä kokonaishiilidioksidipäästöistä on fossiilista alkuperää. CO-, HC- ja NO_x-päästöjen suhteen tulokset vaihtelevat, eikä yksiselitteistä arviota vaikutuksesta voida muodostaa. Käytännön moottoritehoihin etanolin käytöllä ei useimpien tutkimusten mukaan ole merkittävää vaikutusta. Etanolilla on tavanomaiseen bensiiniin ja dieseliin verrattuna alhaisempi energiatiheys ja etanolin stökiometrinen ilma/polttoainesuhde on pienempi, mutta toisaalta etanolin suurempi oktaaniluku ja höyrystymislämpö mahdollistavat puristussuhteen nostamisen, mikä puolestaan parantaa moottorin tehoa. Tällöin kyse on kuitenkin varsinaisista etanolikäyttöön suunnitelluista moottoreista, joita nykyisin on tarjolla varsin harvojen autonvalmistajien mallistoissa.

Biodieselin käytön on havaittu pienentävän CO-, HC- ja hiukkaspäästöjä verrattuna tavanomaiseen dieseliin. NO_x-päästöjen on useimmissa tutkimuksissa raportoitu jonkin verran kasvavan käytettäessä biodieseliä. Kokonaishiilidioksidipäästöjen osalta ei biodieselin käytöllä ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta suhteessa

tavanomaiseen dieseliin, mutta jälleen on huomioitava, että vain pieni osa biodieselin poltossa syntyvistä kokonaishiilidioksidipäästöistä on fossiilista alkuperää. Osassa tutkimuksista moottoritehojen on havaittu jonkin verran laskevan biodieselin käytön vaikutuksesta, mutta monissa tutkimuksissa merkittävää vaikutusta ei ole voitu osoittaa.

Biodieseliä voidaan käyttää myös traktoreissa ja muissa työkoneissa. Muun muassa traktorinvalmistaja Valtra on hyväksynyt 100-prosenttisen esteröidyn ja normien mukaisen biodieselin kaikkien Valtroissa käytettyjen SisuDiesel- ja Valmet-moottorien polttoaineeksi (Valtra, 2007). Lisäksi biodieseliä voidaan käyttää öljypolttimissa. Suurin osa nykyaikaisista öljypolttimista pystyy polttamaan myös biodieseliä (Kasvun Ympäristö, 2007). Tässä tutkimuksessa liikennepolttoaineiden käyttövaihetta ei elinkaarimalleissa huomioitu, koska käyttövaiheen mukaan ottamiseen ei saatu riittävästi tietoja. Käytön päästöjä tarkasteltiin kuitenkin erikseen biodieselin (RME) ja bioetanolin osalta käyttäen Bernessonin (2004) eri lähteistä kokoamia ja laskemia päästöarvioita (taulukko 15) sekä mineraalidieselin osalta käyttäen VTT:n LIPASTO-tietokannan tietoja.

Taulukko 15. Liikennepolttoaineiden käyttövaiheen päästöarviot (Bernesson 2004).

	100 % fossiilinen diesel ¹⁾	100 % RME	100 % bioetanol
	mg/MJ _{engine}	mg/MJ _{engine}	mg/MJ _{engine}
Hiukkaset	20,8	8,33	5,56
CO	147	122	735
HC	47,2	22,2	89,2
NO _x	1640	1850	938
SO ₂	51,9	11,8	0
Fossiilinen CO ₂	200 000	11 100	21 000

¹⁾ Standardin EN590 mukainen dieselpolttoaine

Ruokohelpi

Ruokohelpin polton vaikutusta polttolaitosten päästöihin yritettiin selvittää polttolaitoksille tehdyllä kyselyllä. Nykyiset ruokohelpin polttomäärät ovat kuitenkin niin pieniä, että pelkästään kokonaispäästöistä on mahdoton päätellä, kuinka suuri osuus päästöistä syntyy ruokohelpistä ja kuinka suuri osuus pääpolttoaineesta, koska esimerkiksi turpeen rikkioksidien päästöt vaihtelevat paljon turve-erästä riippuen. Tästä huolimatta päätettiin analysoida Vaskiluodon Voiman aineisto kahdesta eri polttokokeesta, jotta saataisiin selville, millaista informaatiota ruokohelpin poltosta on voimalaitoksilta saatavilla.

Vaskiluodon Voimalta saadun yksittäisten polttokokeiden tiedoista, jotka on mitattu kahden päivän väliajalla, saatiin selville, että yksiselitteisiä päästölukuja ruokohelpin poltolle ei voida muodostaa datan perusteella, joten ruokohelpin polton päästöt joudutaan selvittämään kirjallisuudesta. Ongelmana Vaskiluodon Voiman datassa on, että ruokohelpin vaikutusta ei vielä kahden polttokokeen datan perusteella voida luotettavasti erottaa muiden tekijöiden vaikutuksista.

Toisaalta voidaan sanoa, että poltettaessa 2-5 % ruokohelpeä (tässä seospolttoaineena on jätepuusta tehty hake), pienentyvät rikkidioksidi- ja typpioksidipäästöt keskiarvoltaan tilastollisesti merkitsevästi tuotettua megawattia kohden. Tilastollinen merkitsevyys testattiin SAS 9.0 -ohjelmistolla. Datasta voi laskea myös arvion sille, kuinka suuri vaikutus ruokohelpin poltolla on päästöjen laskuun. Käytettävissä olevan datan perusteella voidaan karkeasti arvioida, että 2-5 % ruokohelpin poltto vähentää yhtä prosenttiyksikköä poltettua ruokohelpeä kohden

- rikkipäästöjä $0,067 \pm 0,029 \text{ SO}_2[\text{mg}/\text{Nm}^3]/\text{MW}$ ja
- typpipäästöjä $0,094 \pm 0,040 \text{ NO}_x[\text{mg}/\text{Nm}^3]/\text{MW}$.

Esitetyt arvot on laskettu Vaskiluodon Voiman aineistosta (ks. taulukko 16). Arvio on tehty kahden polttokokeen perusteella. Molemmista polttokokeista on noin 500 päästö- ja tehomittaus. Esitetyt epävarmuusrajat liittyvät tässä ruokohelpin polttomäärään, eivätkä ota kantaa muihin poltossa esiintyviin vaihteluihin. Tarkempia arvoja tarvittaessa täytyy tukeutua kirjallisuuteen.

Taulukko 16. Ruokohelpin polttokoeaineiston perusteella lasketut, tilastollisesti merkitsevät päästövähennykset megawattia kohden.

	$\text{SO}_2[\text{mg}/\text{Nm}^3]/\text{MW}$	$\text{NO}_x[\text{mg}/\text{Nm}^3]/\text{MW}$
Keskiarvo, ei ruokohelpeä	1,434995	1,474872
Keskiarvo, ruokohelpeä	1,244709	1,207164
Keskiarvojen erotus	0,190286	0,267708
Erotus ruokohelpiprocenttia kohden		
ruokohelpeä 2 %	0,095143	0,133854
ruokohelpeä 5 %	0,038057	0,053542
Keskimääräinen erotus per prosentti	0,0666	0,093698
Epävarmuus (ruokohelpimäärästä)	0,028543	0,040156

Taulukossa 17 on esitetty kirjallisuuden perusteella arvioidut ruokohelpin polton päästöt. Paulrudin ja Nilssonin (2001) tutkimuksessa annetut NO-päästöt on tulkittu NO_x -päästöiksi, koska noin 95 prosenttia NO_x -päästöistä on juuri NO-päästöjä (Raiko ym., 1995).

Taulukko 17. Ruokohelpin polton keskimääräiset päästöt megajoulea kohden kirjallisuuden perusteella arvioituina (Paulrud & Nilsson, 2001).

Päästö	g/MJ
CO	0,042
NO_x	0,068
CH_4	0,00
N_2O	0,00
SO_2	0,11

Viljan olki sekä rypsin ja rapsin korsi

Tanskassa on tehty vuosina 1987-1993 päästömittauksia oljen poltolle 13 kaukolämpölaitoksella Näiden mittausten tulokset on esitetty taulukossa 18. Tanskassa oljen polttokosteus on yleensä 14-20 %, kun Suomessa harvoin päästään alle 20 %:n kosteuteen. Bhattacharyan ym. (2002) tekemien biomassan

polttokokeiden mukaan polttoaineen kosteuspitoisuuden nousu vaikuttaa polton päästöihin seuraavasti: CO-päästöt nousevat, koska kaasutusvaiheen reaktiot alenevat lämpötilan laskiessa kosteuden ollessa korkeampi, NO_x-päästöt laskevat alhaisemman lämpötilan vuoksi ja CH₄-päästöt pysyvät suurin piirtein ennallaan.

Taulukko 18. Tanskassa tehtyjä päästömittauksia oljen poltolle kaukolämpölaitoksilla (The Centre of Biomass Technology, 1998).

	Keskiarvo	Minimi	Maksimi
	g/MJ	g/MJ	g/MJ
Hiukkaset ¹⁾	0,04	0,003	0,10
CO	0,60	0,12	1,15
NO _x ²⁾	0,09	0,04	0,15
SO ₂ ³⁾	0,13	0,10	0,17
HCl	0,04	0,015	0,08
PAH	0,00018	0,0001	0,0003

¹⁾ Laitoksilla on käytössä pussisuodatin

²⁾ Laskettu NO₂-ekvivalenteina

³⁾ Määritetty oljen rikkipitoisuuden perusteella, 35-43 % rikistä sitoutuu tuhkaan

Pienille maatilakokoluokan olkikattiloille ei ole olemassa mitattuja päästöarvoja. Tanskassa on kuitenkin määritelty pienien kattiloiden päästöraja-arvot hiilimonoksidille (2,5 g/Nm³) ja palamattomille hiilivedyille (150 mg/Nm³ jatkuvatoiminen kattila ja 200 mg/Nm³ panoskattila), joiden alle päästöjen voidaan olettaa jäävän. Hiukkaspäästöille ei raja-arvoa enää ole (vuonna 2000 raja-arvo oli 600 mg/Nm³). (Nikolaisen, 2008) Suomessa ei ole päästöraja-arvoja pienille alle 50 MW:n laitoksille, vaan päästörajat esimerkiksi ympäristölupiin määritellään yleensä parhaan käyttökelpoisen tekniikan perusteella. Suunnitteilla olevassa valtioneuvoston asetuksessa on kuitenkin tarkoituksena määritellä päästöraja-arvot myös pienille energiantuotantolaitoksille. Taulukossa 19 on esitetty nämä suunnitellut raja-arvot, joiden alle myös maatilakattiloissa tapahtuvan oljen polton päästöjen tulisi jäädä.

Taulukko 19. Pienten energiantuotantoyksiköiden suunnitellut päästöraja-arvot Suomessa puun ja muiden kiinteiden biopolttoaineiden poltolle (Salo-Asikainen, 2007).

	Hiukkaset, mg/Nm³	NO_x, mg/Nm³	SO₂, mg/Nm³
Olemassa olevat 1-5 MW:n laitokset	< 350	< 450	< 200
Uudet 1-5 MW:n laitokset	< 250	< 250	< 200

Polton päästöjen lisäksi oljen hyötykäytön päästöissä tulee huomioida myös lannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt, koska oljen ja korren korjuun mukana menetetään ravinteita, jotka täytyy korvata lannoitteilla. Taulukossa 20 on esitetty oljen ja korren sisältämät typpi-, fosfori- ja kaliumpitoisuudet sekä korjuun seurauksena menetettävät ravinteet hehtaaria kohden, kun kasvit pystyvät käyttämään hyödyksi 65 % olkien ja korsien sisältämästä tyydestä, fosforista ja kaliumista.

Taulukko 20. Viljan oljen sekä rypsin ja rapsin korjuun seurauksena menetettävät ravinteet, jotka täytyy korvata kemiallisilla lannoitteilla.

	Pitoisuus, % kuiva-aineesta (Alakangas 2000)	Korvattava ravinnemäärä, kg/ha
Viljan olki yleisesti:		
Typpi	0,5	6,9
Fosfori	0,07	1,0
Kalium	0,99	13,7
Rypsin ja rapsin korsi:		
Typpi	0,8	8,9
Fosfori	0,085	1,0
Kalium	0,58	6,5

Oljen ja korren korjuun seurauksena menetettäviä ravinteita korvaamaan voidaan käyttää NPK-lannoitetta, jonka NPK-suhde on 18:8:16. Tällöin sopivin lannoitusmäärä olisi viljan oljen korjuun seurauksena noin 40 kg/ha ja rypsin korren 50 kg/ha. Lannoitusmäärän laskennassa on kokonaan korvattavaksi valittu typpi, jolloin oljen korjuun seurauksena menetetään huomattava määrä kaliumia ja peltoon tulee hiukan liian paljon fosforia. Lannoitteiden aiheuttamissa päästöissä on otettu huomioon vain lannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt, joiden tiedot perustuvat Yaran tietoihin.

4.2. Vertailuketjut

Nestemäisten biopolttoaineiden vertailuketjuina ovat bensiini- ja dieselketju, jotka sisältävät raakaöljyn tuotannon, kuljetukset, jalostuksen, polttoaineen jakelun ja käytön moottorissa. Bensiiniketjua on verrattu bioetanolilla seostetun bensiinin ketjuun ja dieselketjua vastaavasti biodieselillä seostetun dieselin ketjuun. Nestemäisten polttoaineiden vertailukuviin vertailupolttoaineeksi on valittu fossiilinen diesel.

Bensiinin ja dieselin moottorikäytölle on olemassa VTT:n tiedot LIPASTO-tietokannasta, joilla lasketaan liikenteen yksikköpäästöjä ja kansallisia päästöarvioita. Bensiinin lämpöarvo on noin 43 MJ/kg ja dieselin noin 42,8 MJ/kg. Bensiiniketjun eli valmistusprosessien, jakelun ja moottorikäytön keskimääräiset päästöt ja primäärienergian kulutus on esitetty taulukossa 21 ja dieselketjun vastaavat tiedot taulukossa 22. Bensiinin tuotantoketjun välilliseksi CO₂-päästöiksi on myös esitetty noin 12,5 g/MJ (Edwards ym., 2006). Joka tapauksessa tuotantoketjun välilliset päästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin moottorikäytön päästöt.

Taulukko 21. Bensiinin moottorikäytön ja välillisten päästöjen, eli valmistusprosessin ja jakelun keskimääräiset päästöt megajoulea kohden (polton päästöt:
<http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/henkiloautot/habens.htm>,
 välilliset päästöt: Neste, dieselin ekotasetiedote, rehevöityminen: Bernesson, 2004).

Päästö	Poltto, g/MJ	Välilliset päästöt, g/MJ	Yhteensä, g/MJ
CO ₂	72,4	4,67	77,07
CH ₄	0,004		0,004
N ₂ O	0,002		0,002
CO	1,0	0,0055	1,0055
NO _x	0,17	0,025	0,195
SO ₂	0,0004	0,012	0,0124
NH ₃	0,012		0,012
NMVOG	0,084	0,0017	0,0857
PM	0,0016	0,0017	0,0033
PO ₄ - ekv.			0,024
Primäärienergia, MJ/MJ	1	0,08	1,08

Taulukko 22. Dieselin moottorikäytön ja välillisten päästöjen eli valmistusprosessin ja jakelun keskimääräiset päästöt megajoulea kohden (polton päästöt:
<http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/henkiloautot/hadies.htm>,
 välilliset päästöt: Neste, dieselin ekotasetiedote, rehevöityminen: Bernesson, 2004).

Päästö	Poltto, g/MJ	Välilliset päästöt, g/MJ	Yhteensä, g/MJ
CO ₂	72,9	4,67	77,57
CH ₄	0,004	-	0,004
N ₂ O	0,02	-	0,02
CO	0,22	0,0055	0,22
NO _x	0,6	0,025	0,63
SO ₂	0,0005	0,012	0,013
NH ₃	0,004	-	0,004
NMVOG	0,083	0,0017	0,085
PM	0,0018	0,0017	0,0035
PO ₄ - ekv.	-	-	0,024
Primäärienergia, MJ/MJ	1	0,08	1,08

Ruokohelpin, viljan oljen ja rypsin sekä rapsin korren polton vertailuketjuina ovat turve- ja metsätähdehakeketjut. Turpeen hankintaketjun eli välilliset päästöt ja polton päästöt on esitetty taulukossa 23. Hakkeen hankintaketjun ja polton päästöt on puolestaan esitetty taulukossa 24.

Taulukko 23. Turpeen hankintaketjun päästöt (Mälkki & Frilander, 1997) ja polton päästöt (Tilastokeskus, 2004, Muraleedharan ym., 2000, Monni ym., 2004).

Päästö	Polton päästöt, g/MJ	Välilliset päästöt, g/MJ	Yhteensä, g/MJ
CO ₂	106	1,18	107,18
CO	1,06	0,00	1,06
CH ₄	0,17	0,00	0,17
N ₂ O	0,00	0,00378	0,00378
NO _x	0,00	0,0142	0,0142
SO ₂	0,15	0,00236	0,15236

Taulukko 24. Metsätähdehakeen hankintaketjun ja polton päästöt (Mälkki & Virtanen, 2001).

Päästö	Polton päästöt, g/MJ	Välilliset päästöt, g/MJ	Yhteensä, g/MJ
CO ₂	0,00	133,28	133,28
CO	0,023	0,00	0,023
CH ₄	0,00	0,00022	0,00022
N ₂ O	0,00	0,00141	0,00141
NO _x	0,091	0,0703	0,1613
SO ₂	0,0023	0,0041	0,0064

4.3. Allokoinnit ja hyvitykset

Bioetanoli

Laskelmissa on ilmoitettu tulokset ensin siten, että kaikki kuormitukset on kohdennettu etanolille. Lisäksi on sovellettu korvauseriaatetta sivutuotteena syntyvien rehujakeiden mahdollisesti tuoman ympäristöhyödyn arvioimiseksi. Siinä rankin sisältämä valkuaisaine on arvioitu korvaavan vastaavaa määrää soijavalkuaista sikojen ruokinnassa ja sokerin ollessa raaka-aineena puristeleikkeen on oletettu korvaavan energiasisällöltään vastaavaa määrää rehuohraa nautakarjan ruokinnassa. Laskettaessa korvaavuutta soijarehulla, korvautuu soijaa kuiva-aineena 55 % rankin kuiva-ainemäärästä. Kilogramma puristeleikettä puolestaan korvaa 0,30 kg rehuohraa. Ohran ja vehnän kuorelle ei allokoitu kuormituksia. Viljan kuorta on mahdollista polttaa mm. hakeen ja turpeen seassa, jolloin huomattavan suuri määrä laitoksen vaatimasta lämpöenergiantuotannosta voitaisiin saada vehnän ja ohran kuoria polttamalla, mutta tätä ei kuitenkaan huomioitu tässä tutkimuksessa.

Biokaasuskenaariossa jäännös, jota saadaan rankin biokaasutuksesta, oletettiin käytettäväksi maanparannusaineena ja sille ei allokoitu kuormituksia. Myöskään perunan solunesteelle, sokerijuurikkaan naateille, sokerijuurikkaan mukana tulleelle mullalle ja viljan oljille ei allokoitu kuormituksia.

Bernesson ym. (2006) ovat vertailleet eri allokointimenetelmiä etanolin ja sen sivutuotteiden kesken. Tulosten mukaan allokointimenetelmä vaikuttaa tuloksiin ratkaisevasti, sillä käytettäessä tuotteiden energiasisältöön perustuvaa fysikaalista allokointia, kohdentuu 61 % kuormituksista etanolille, ja käytettäessä taloudellista allokointia, kohdentuu kuormituksista peräti 94 % etanolille. Tutkimuksessa on tehty laskelmia myös substituutiomenetelmällä, jossa rankin on oletettu korvaavan

soijarehua. Tutkimustulosten mukaan kasvihuonekaasupäästöt sekä rehevöittävät päästöt ja troposfääristä otsonia muodostavat päästöt ovat tällöin samaa luokkaa kuin taloudellisella allokaatiolla, eli noin 94 % kuormituksista. Mäkinen ym. (2006) käyttivät myös samankaltaista substituutiomenetelmää, jossa etanolille kohdentuva määrä kuormituksista on kuitenkin hyvin lähellä 100 %:a. Erot voivat johtua eroista soijarouheen ekotaseissa.

Hämeen ammattikorkeakoulun tekemässä tutkimuksessa (Kymäläinen, 2007) sivutuotejakeiden taloudellinen arvo on noin 6 milj. euroa vuodessa. Laskettaessa maailmanmarkkinahinnalla 0,60 euroa/litra etanolille kohdistuisi noin 83 % kuormituksista.

Biodiesel

Biodieselin tuotannossa on tehty allokoiteja rypsin puristuksessa, jossa syntyy tuotteina rypsiöljyä sekä prosessista riippuen rypsirouhetta tai -puristetta pääasiassa rehukäyttöön. Toisin kuin useilla elintarviketeollisuuden sivutuotteilla, rypsirouheella ja -puristeella on merkittävä taloudellinen arvo. Tämän vuoksi allokoiti rypsiöljyn ja rypsirouheen välillä on tehty sekä näiden tuotteiden taloudelliseen arvoon, että vertailun vuoksi myös massaan perustuen.

Taloudellisen arvon perusteena on käytetty Tilastokeskuksen perushintoja, jotka kuvaavat tuotteiden hintoja pidemmällä aikavälillä, toisin kuin hetkelliset markkinahinnat. Perushinnoilla rypsiöljyn arvo on 70,6 % öljyn ja rouheen/puristeen yhteisarvosta.

Massaperusteisessa allokoinnissa öljyn saanto rypsin siemenen massasta on 39 % teollisessa puristuksessa, jota käytetään NExBTL-dieselin raaka-aineen valmistuksessa. Pienen kokoluokan puristuksessa öljyn saanto on 31,3 % siemenen massasta.

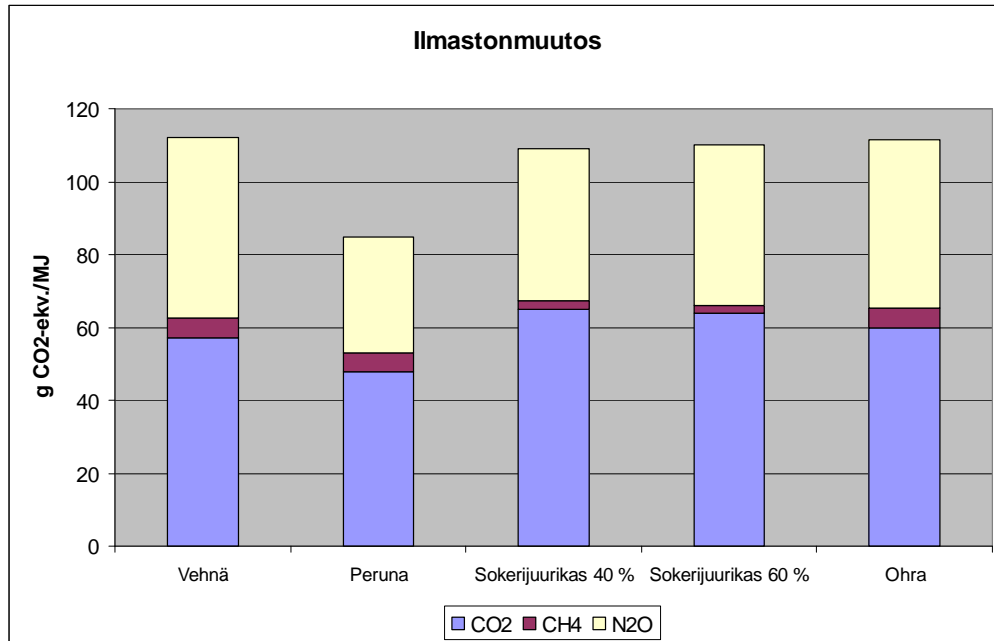
5. INVENTAARIOTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

5.1. Nestemäiset biopolttoaineet

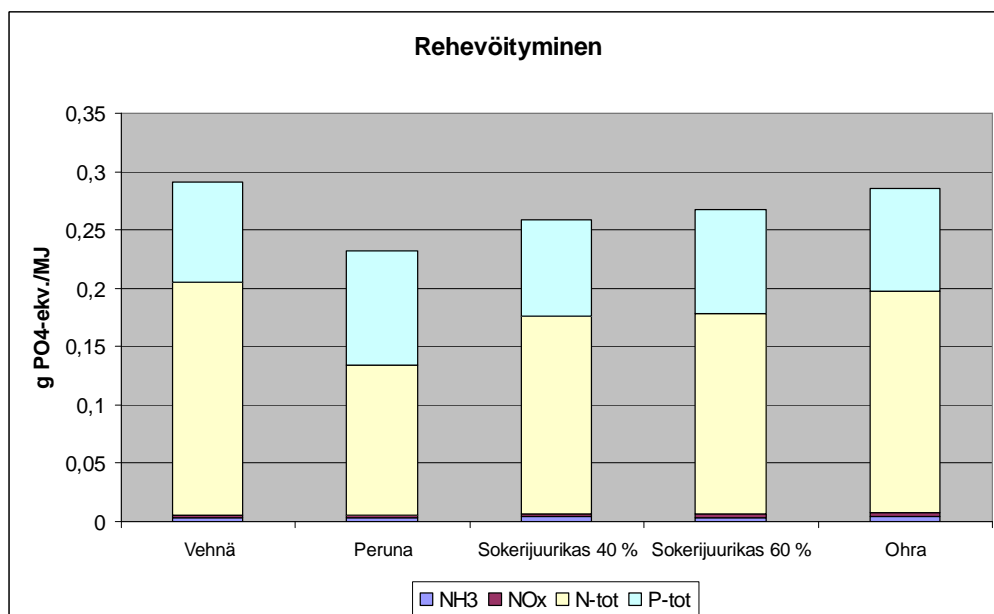
5.1.1. Bioetanoli

Kuvissa **6**, **7**, **8**, **9** ja **10** on esitetty elinkaari-inventaarion lopputulokset bioetanolin valmistuksesta raaka-aineittain siten, että kaikki kuormitukset on laskettu etanolille. Taulukkoarvot kuvien luvuista on esitetty liitteessä 2. CO₂-ekvivalenttimäärä Mäkisen ym. (2006) tutkimuksessa oli 0,112 kg/MJ, kun kaikki kuormitukset oli kohdennettu etanolille, mikä vastaa myös tämän tutkimuksen arvoja ohralle ja vehnälle. Sokerijuurikasraaka-aineelle on laskettu 2 skenaariota, 40 % juurikasta ja 60 % ohraa ja 60 % juurikasta ja 40 % ohraa. Perunan osalta on oletettu, että 50 % etanolista tuotetaan perunasta ja 50 % ohrasta. Huomion arvoista on, että bensiinin CO₂-ekvivalenttimäärä on 0,077 kg/MJ. Laskelma, jossa kaikki kuormitukset on kohdennettu päätuotteelle, on varsin lähellä taloudellista allokoitua, sillä sivuvirtojen

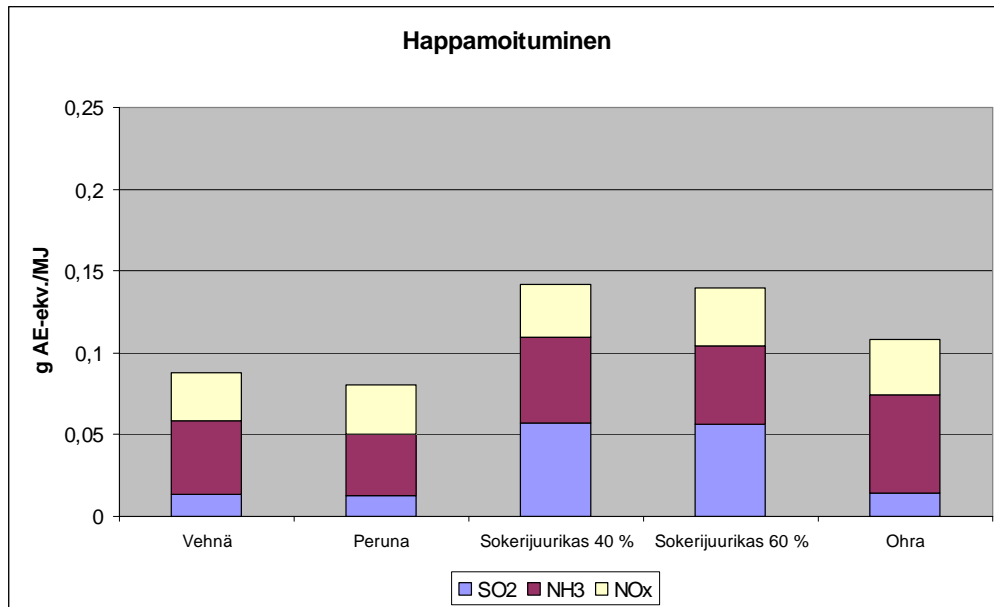
taloudellinen arvo on varsin vähäinen, ellei rankkia kuivata. Sokerijuurikas pohjaisen laitoksen korkeat CO₂-pitoisuudet johtuvat osittain siitä, että bioetanolilaitoksen lämpöenergia tuotetaan hiilellä ja öljyllä maakaasun sijasta. Samasta syystä taas CH₄-päästöt ovat sokerijuurikas pohjaisissa laitoksista matalammat kuin muilla tutkituilla laitoksilla. Primäärienergian kulutus on selvästi alhaisempi kuin Mäkisen ym. (2006) tutkimuksessa. Tämä johtuu osittain siitä, että tässä tutkimuksessa rankkia ei kuivata



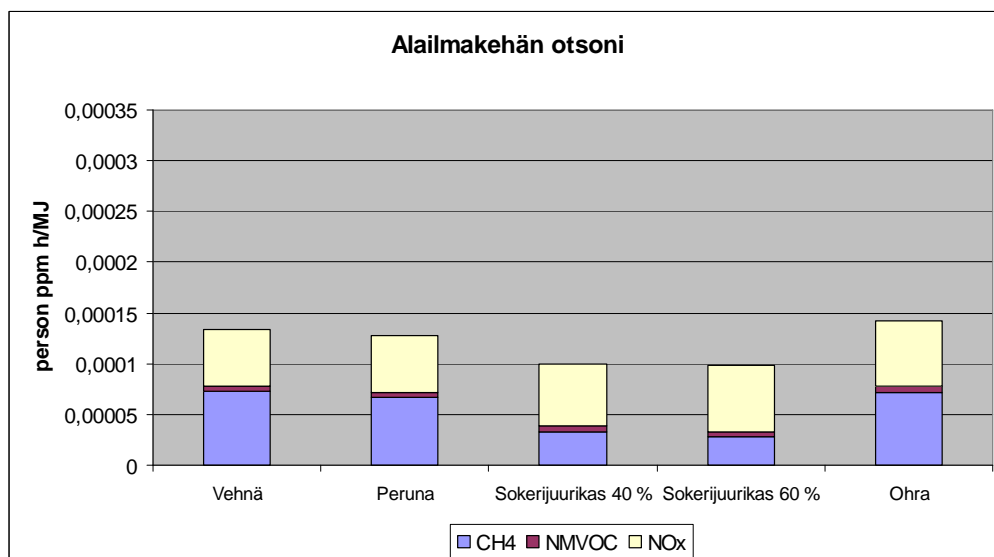
Kuva 6. Bioetanolin valmistuksen vaikutukset ilmastonmuutokseen eri raaka-ainevaihtoehtoilla.



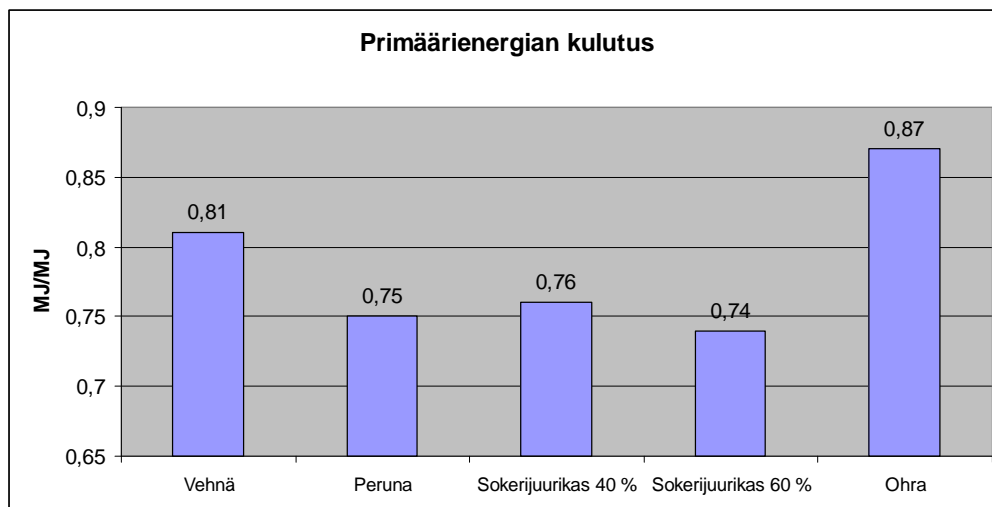
Kuva 7. Bioetanolin valmistuksen vaikutukset vesistöjen rehevöitymiseen eri raaka-ainevaihtoehtoilla.



Kuva 8. Bioetanolin valmistuksen vaikutukset happamoitumiseen eri raaka-ainevaihtoehdoilla.

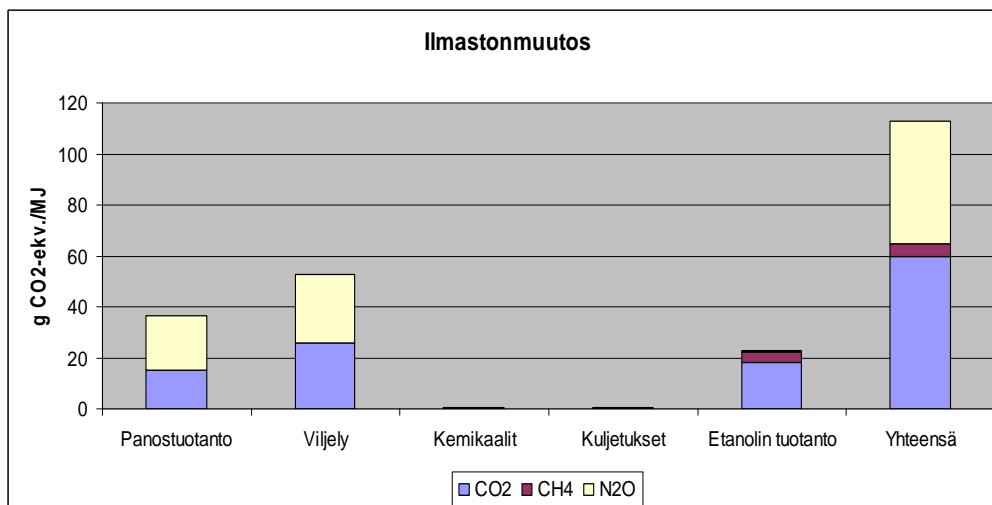


Kuva 9. Bioetanolin valmistuksen vaikutukset alailmakehän otsonin muodostumiseen eri raaka-ainevaihtoehdoilla.

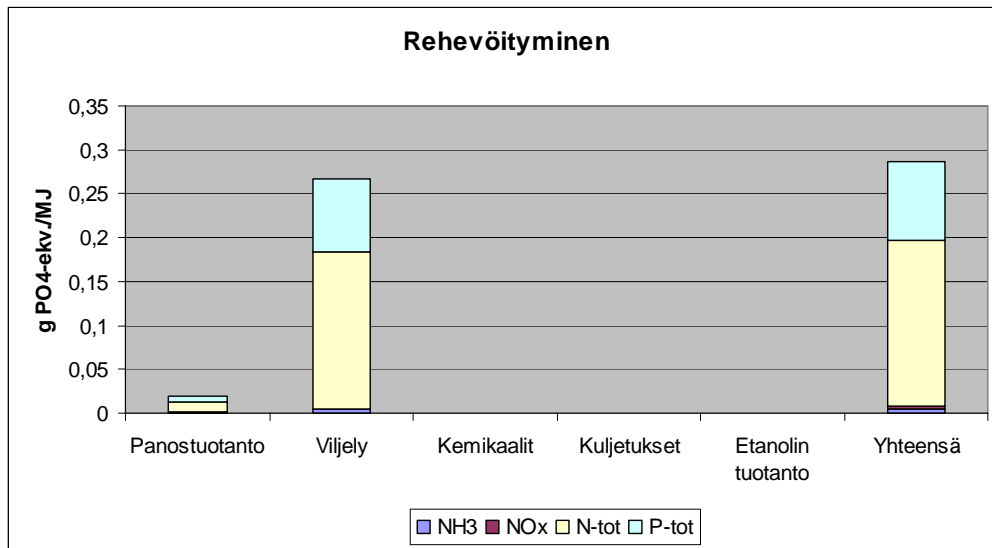


Kuva 10. Bioetanolin valmistuksen primäärienergian kulutukset eri raaka-ainevaihtoehtoilla.

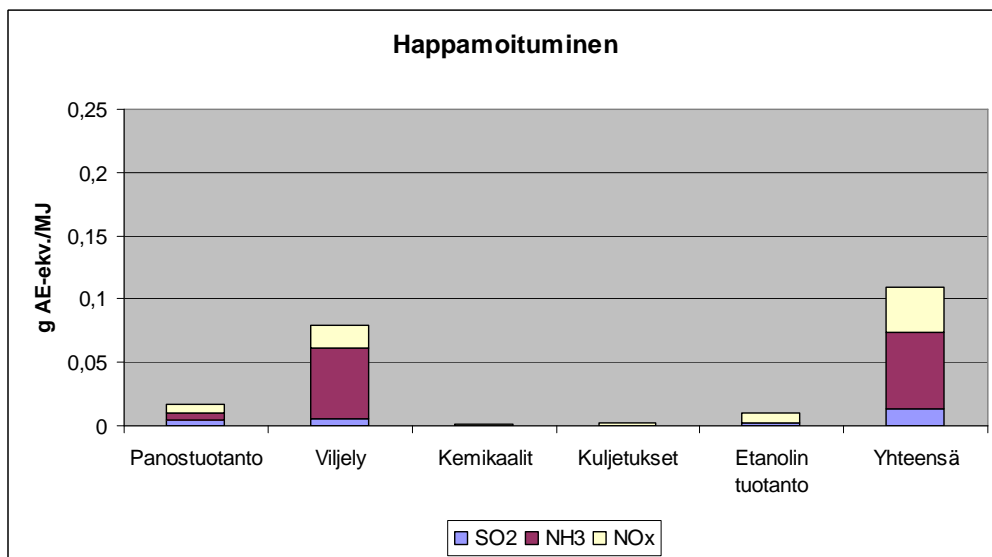
Kuvissa 11, 12, 13, 14 ja 15 on esitetty elinkaariarvioinnin lopputulokset tuotantovaiheittain eriteltyinä käyttäen lähtötietoina Lantmännen Agroetanolin tietoja etanolin tuotantoprosessista. Prosessin raaka-aineena on ohra ja allokointi on tehty päätuotteelle. Huomattavaa on, että tutkitussa aineistossa monissa kotimaisissa bioetanolin tuotantosuunnitelmissa etanolin tuotantoprosessin kuormitusluvut olivat selvästi korkeammat, eräiden komponenttien osalta jopa noin 50 %.



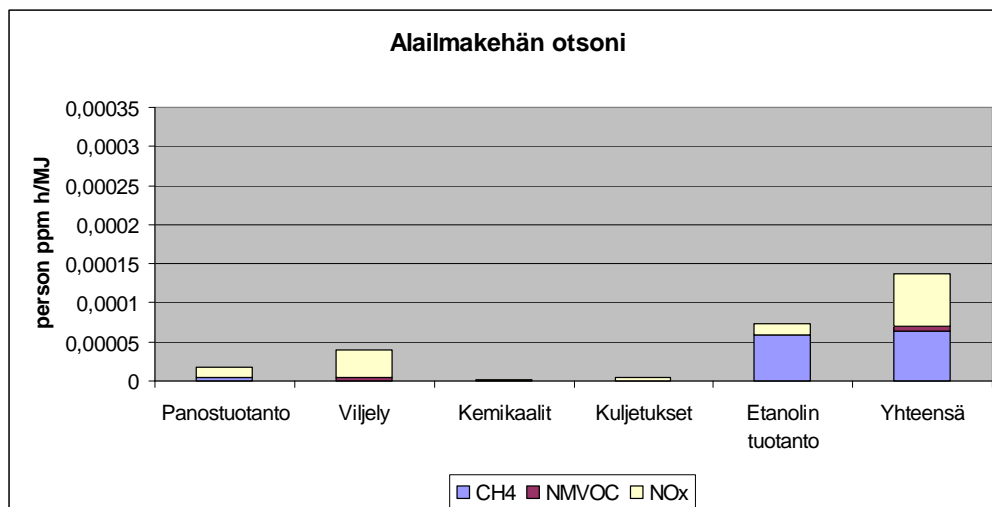
Kuva 11. Bioetanolin valmistusketjun vaikutukset ilmastonmuutokseen ketjun vaiheittain.



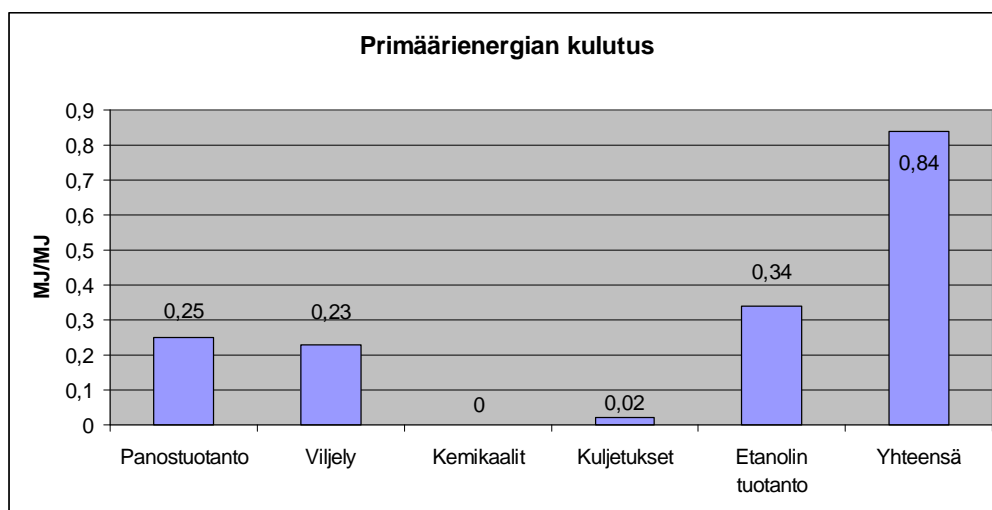
Kuva 12. Bioetanolin valmistusketjun vaikutukset vesistöjen rehevöitymiseen ketjun vaiheittain.



Kuva 13. Bioetanolin valmistusketjun vaikutukset happamoitumiseen ketjun vaiheittain.



Kuva 14. Bioetanolin valmistusketjun vaikutukset alailmakehän otsonin muodostumiseen ketjun vaiheittain.



Kuva 15. Bioetanolin valmistusketjun primäärienergian kulutus ketjun vaiheittain.

Pääosa kuormituksista tulee alkutuotannosta, eli viljelystä ja panostuotannosta. Tästä johtuen raaka-aineena perunaa käyttävän etanolin tuotantojärjestelmän kuormitusluvut ovat selvästi pienemmät kuin muiden tutkittujen raaka-ainevaihtoehtojen, koska perunan viljely vaatii vähemmän tuotantopinta-alaa (taulukko 4). Perunaa käsiteltäessä tulee paljon sivutuotteita, joille voitaisiin mahdollisesti jatkossa kohdentaa isompi osa kuormituksista, kuin mitä tässä tutkimuksessa on kohdistettu. Sokerijuurikkaan osalta kirjallisuustietojen mukaan päästäisiin samoihin kuormituslukuihin kuin perunalla, jos raaka-aineena voitaisiin käyttää yksinomaan sokerijuurikkasta, sillä myös sokerijuurikkaan hehtaarikohtaiset sadot ovat suuria (mm. Edwards ym., 2006).

Viljelymaan kalkitus on vähentynyt viime vuosina. Tämän tutkimuksen lähtöaineistossa on havaittavissa laskeva trendi siten, että kalkitusmäärät voivat tällä

hetkellä olla jopa 40 % pienemmät kuin tässä tutkimuksessa käytetyt 2002-2006 keskiarvoluvut. Kalkin käytön kehitystä on kuitenkin vaikea lähteä ennustamaan. Todettakoon kuitenkin, että kalkin kulutuksen 40 % vähennys vähentäisi viljelyn hiilidioksidipäästöjä 25 %.

Reijners & Huijbregts (2007) ilmoittavat vehnäpohjaisen etanolin CO₂-päästöiksi 2,1-3,0 kg CO₂/kg etanolia ja N₂O-päästöiksi 0,6-2,5 kg CO₂-ekvivalenttia/kg etanolia, josta saadaan laskettuna etanolin energiasisältöä kohden 115-219 g CO₂-ekv./MJ. Tämän tutkimuksen mukaan bioetanolin tuotanto peltopohjaisista raaka-aineista ei siis vähentäisi kasvihuonekaasupäästöjä, mutta taas Elsayedin ym. (2003) tutkimusten mukaan vehnäpohjaisen etanolin primäärienergiantarpeeksi on arvioitu 0,464 MJ/MJ ja kasvihuonekaasupäästöiksi 0,029 kg CO₂-ekv./MJ, joka on taas lähempänä Bernessonin ym. (2006) tuloksia. Sokerijuurikas pohjaisen etanolin energiantarpeeksi Elsayed ym. (2003) ilmoittavat 0,496 MJ/MJ ja kasvihuonekaasupäästöiksi 0,040 kg CO₂-ekv./MJ, kun taas Reijners & Huijbregts (2007) ilmoittavat kasvihuonekaasukuormituksiksi 0,024-0,036 kg CO₂-ekv./MJ.

Edwards ym. (2003) ilmoittavat kasvihuonekaasupäästöiksi vehnäpohjaiselle etanolille 40-60 g CO₂-ekv/MJ ja sokerijuurikkaalle 35-60 g CO₂-ekv/MJ. Vehnän satotaso on 8000 t/ha, eli kaksinkertainen suomalaisen vehnän viljelyyn nähden, mistä aiheutuu ero tähän tutkimukseen. Etanolin tuotannosta sokeriruo'osta tulee kasvihuonekaasupäästöjä Edwardsin ym. (2006) mukaan vain 20 g CO₂-ekv/MJ. Suurin osa sokeriruo'on prosessoinnissa käytetystä energiasta on uusiutuvaa (Edwards ym., 2006). Kaiken kaikkiaan on todettava, että arviot bioetanolin elinkaarisista kasvihuonekaasupäästöistä vaihtelevat erittäin paljon. Eroja synnyttävät sekä tuotantojärjestelmissä ilmenevät erot, kuten erilaiset satotasot, että erilaiset allokonti ja hyvitysmenettelyt.

Sivuvirtojen huomioiminen ympäristövaikutuksissa

Taulukossa 25 on esitetty ympäristökuormitusten inventaariotulokset ja taulukossa 26 kuormituksia vastaava ympäristövaikutusten arvio skenaariolle, jossa korvausperiaatetta soveltaen on huomioitu ympäristökuormitusten muutokset, kun puristeleike korvaa rehuohraa sokerijuurikasta raaka-aineena käytettäessä, ja vilja- sekä perunarankin sisältämä valkuainen soijarouheen sisältämää valkuaista. Koska karjatiloilta toimitettavaa rankkia ei kuivata, on siihen säilyvyyden parantamiseksi oletettu lisättävän 1 kg 80 %:sta muurahaishappoliuosta rankkitonnia kohden. Taulukoista 25 ja 26 on huomioitava, että vertailuna esitetyn bensiinin ympäristökuormituksissa on bensiinin käyttö mukana, joka puuttuu bioetanolin kuormituksista.

Taulukko 25. Elinkaari-inventaarion lopputulokset, systeemin laajennus, märkärehun osuus korvaa soijarouhetta sikojen ruokinnassa ja puristeleike korvaa rehuviljaa nautakarjan ruokinnassa.

Ympäristökuormitus	Vehnä	Peruna	Sokerijuurikas 40 %	Ohra	Bensiini
CO ₂ , kg/MJ	0,056	0,048	0,057	0,060	0,077
N ₂ O, mg/MJ	155	94	110	143	0,002
CH ₄ , g/MJ	0,227	0,211	0,107	0,227	0,004
NH ₃ , mg/MJ	143	139	166	174	12
NO _x , mg/MJ	141	139	137	165	195
SO ₂ , mg/MJ	30	31	125	34	12
PM, mg/MJ	11	12	16	13	3
CO, g/MJ	0,041	0,043	0,035	0,051	1,006
NMVOC, mg/MJ	16	15	13	20	86
N, mg/MJ	475	307	359	452	
P, mg/MJ	29	33	25	30	
Primäärienergia, foss, MJ/MJ	0,79	0,72	0,73	0,82	1,08

Taulukko 26. Ympäristövaikutusten arvio bioetanolin valmistuksesta, systeemin laajennus, märkärehun osuus korvaa soijarouhetta sikojen ruokinnassa ja puristeleike korvaa rehuviljaa nautakarjan ruokinnassa.

Ympäristövaikutus	Vehnä	Peruna	Sokerijuurikas 40 %	Ohra	Bensiini
Ilmastonmuutos, kg CO ₂ - ekv./MJ	0,108	0,082	0,092	0,109	0,078
Happamoituminen mg AE-ekv./MJ	111	107	160	128	48
Troposfäärisen otsonin muodostuminen, person ppm h/ MJ	1,29x10 ⁻⁴	1,42x10 ⁻⁴	8,7x10 ⁻⁵	1,44x10 ⁻⁴	9,3x10 ⁻⁵
Rehevöityminen vesistöissä, mg PO ₄ - ekv./MJ	201	172	165	197	24

Korvaavuuksia laskettaessa havaittiin soijarouheen elinkaaritietojen vaihtelevan suuresti tietolähteestä riippuen. Tässä tapauksessa lähteenä on käytetty LCAfood-tietokannasta saatuja tietoja. Näitä tietoja laskettaessa oli sovellettu korvausmenettelyä muun tyyppisen kuormitusten allokoinnin välttämiseksi soijarouheen ja soijaöljyn kesken. Tietokannan antamat tiedot soijarouheen kasviuonekaasupäästöiksi vastasivat Mäkisen ym. (2006) käyttämiä tietoja.

Kaiken kaikkiaan soijan korvaaminen rankilla ei suuresti vaikuta lopputuloksiin, kuten ei Mäkisen ym. (2006) tutkimuksessakaan. Mikäli soijarouheen ja soijaöljyn kesken käytettäisiin tietokannassa taloudellista allokoointia, muuttuisivat korvauslaskelman tulokset jonkin verran edullisemmiksi, mutta bioetanolijetun kuormitukset olisivat edelleenkin suuremmat kuin fossiilisella bensiinillä. Lisäksi voisi olla, että kaikkea rankkia ei pystyittäisi käyttämään hyödyksi soijarehun korvikkeena, vaan osa toimitettaisiin ehkä muuhun käyttöön tai vietäisiin

kaatopaikalle. Ympäristökuormitusten asetelmia tyystin muuttavia kuormituksia ei siis kohdennu bioetanolin valmistuksen sivutuotteille.

Mäkinen ym. (2006) ovat myös laskeneet, miten kasvihuonekaasutaseisiin vaikuttaisi, jos oljella tuotettaisiin kattilalaitoksessa energiaa ja tällä korvattaisiin turpeella tuotettua energiaa. Tuloksena etanolin ilmastonmuutosvaikutus pienenesi noin neljännekseen! Tällöin bioetanolin tuotanto olisi ilmastonmuutoksen vähentämisen kannalta selvästi kannattavaa.

Bernessonin (2004) tutkimustuloksissa bioetanolin elinkaaren ympäristövaikutukset suhtautuvat bensiiniin vastaaviin seuraavasti: ilmastonmuutosvaikutus 52-53 % pienempi, happamoitusvaikutus 4-5 % suurempi, ja troposfäärisen otsonin muodostumisvaikutus 37-48 % suurempi. Ilmastonmuutosvaikutus oli tutkimuksessa vastaavasti 30,5 g CO₂-ekv./MJ ja happamoitusvaikutus 121 mg AE-ekv./MJ. Tämän tutkimuksen arvio happamoitumiselle on siis pienempi kuin Bernessonin (2004). Ilmastonmuutosvaikutusarvion ero johtuu pääosin Ruotsin 1,5 kertaa korkeammista satotasoista sekä mahdollisesti eroista korvattavan soijan elinkaaritiedoissa ja muista oletuksista.

Rankin biokaasutuksesta on tehty laskelmia Hämeenlinnan ammattikorkeakoulussa ja näihin laskelmiin pohjautuen tässä tutkimuksessa on arvioitu skenaario, jossa käytännössä kaikki bioetanoliprosessin kuluttama lämpöenergia saataisiin biokaasusta. Laskelmien mukaan energiaa voitaisiin mahdollisesti saada enemmänkin kuin mitä bioetanoliprosessiin kuluu, biokaasun metaanipitoisuudesta riippuen. Biokaasutusskenaarion elinkaari-inventaariot on esitetty taulukossa 27 ja ympäristövaikutusarviot taulukossa 28.

Taulukko 27. Elinkaari-inventaarion lopputulokset, märkärehusta tehdään biokaasua. Puristeleike korvaa rehuohraa.

Ympäristö-kuormitus	Vehnä	Peruna	Sokerijuurikas 40 %	Ohra	Bensiini
CO ₂ , kg/MJ	0,042	0,034	0,036	0,043	0,077
CH ₄ , g/MJ	0,045	0,026	0,037	0,041	0,002
N ₂ O, mg/MJ	166	107	125	155	0,004
NH ₃ , mg/MJ	84	71	86	113	12
NO _x , mg/MJ	139	141	138	163	195
SO ₂ , mg/MJ	28	27	25	29	12
CO, g/MJ	0,075	0,073	0,073	0,081	3
NMVOC, mg/MJ	23	26	22	27	1,006
PM, mg/MJ	11	10	10	13	93
N, mg/MJ	475	307	359	452	
P, mg/MJ	28	32	26	32	
Primäärienergia, MJ/MJ	0,52	0,47	0,59	0,56	1,08

Taulukko 28. Ympäristövaikutusten arvio bioetanolin valmistuksesta, märkärehusta tehdään biokaasua. Puristeleike korvaa rehuohraa..

Ympäristövaikutus	Vehnä	Peruna	Sokerijuurikas 40 %	Ohra	Bensiini
Ilmastonmuutos, kg CO ₂ - ekv./MJ	0,093	0,067	0,074	0,092	0,078
Happamoituminen, mg AE- ekv./MJ	80	74	77	99	48
Troposfäärin otsonin muodostuminen, person ppm h/ MJ	$7,0 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-5}$	$6,6 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-5}$	$8,6 \times 10^{-5}$
Rehevytymisen vesistöissä, mg PO ₄ -ekv./MJ	195	169	164	204	24

5.1.2. Biodiesel

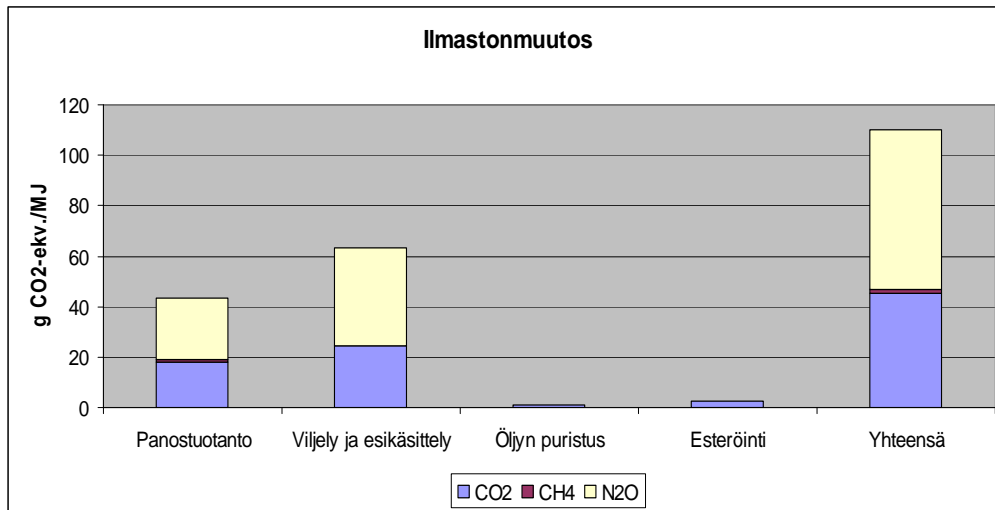
Biodieselin maatilakokoluokan ilmastonmuutosvaikutus on tehdyn inventaarion mukaan 154 g/MJ polttoainetta, kun tuotannon kaikki vaikutukset jyvitetään biodieselin valmistukselle. Kuitenkin tehdyn tutkimuksen perusteella rypsin puristuksessa syntyväälle rypsipuristeelle on tällä hetkellä olemassa kysyntää, pääasiassa naudanhunana. Tästä syystä on luontevaa allokoida jonkin verran vaikutuksia myös rypsipuristeelle (ks. kappale 4.2). Koska muiden sivutuotteiden (sivutuoteglyseroli ym.) hyödyntämismahdollisuudet eivät ole niin ilmeisiä, ja joissakin tapauksissa sivutuotteet ovat jopa ongelmallisia, ei muille sivutuotteille kuin rypsipuristeelle ole jyvitetty ympäristövaikutuksia. Toisaalta myöskään niiden mahdollisesta hävittämisestä aiheutuvia vaikutuksia ei ole huomioitu. Pää- ja sivutuotteiden käyttö kyselytutkimusaineiston mukaan on esitetty taulukossa 29.

Taulukko 29. Tuotteiden ja sivutuotteiden käyttö maatilamittakaavan biodiesel-tuotannossa..

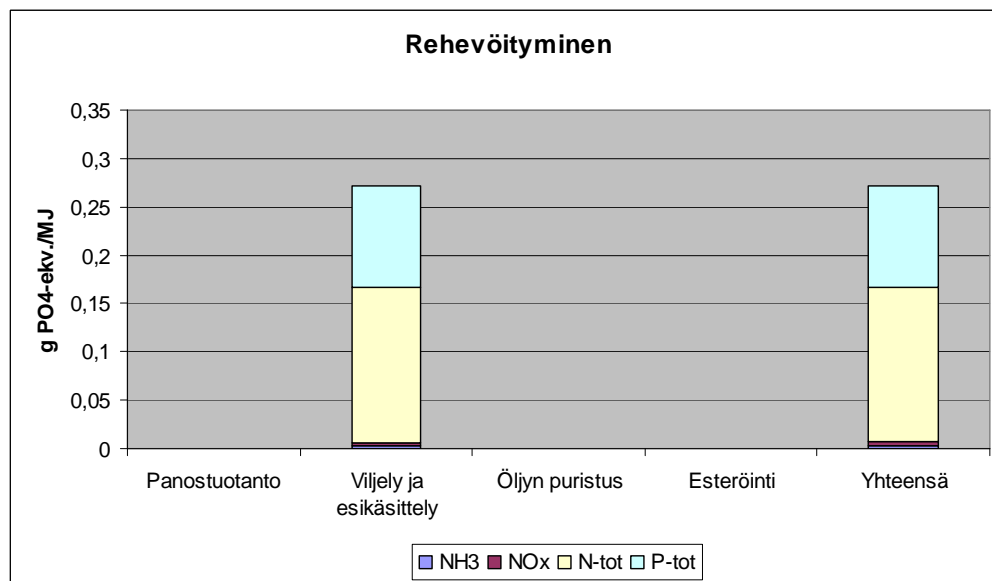
Tuote	Käyttökohteet
Biodiesel	käytetty pääasiassa omassa yrityksessä, myös myyty ulos käyttökohteet: lämmitys (54 %), työkoneet (34 %) ja ajoneuvot (12 %)
Rypsipuriste	käytettiin rehuksi lähinnä naudoille, sekä lypsy- että lihakarjalle
Rypsiöljy	pääasiassa biodieseltuotantoon, lisäksi rehukäyttöön (hevoset, emakot), polttoaineeksi sellaisenaan autoon ja tekniseksi öljyksi (mm. teräketjuöljy)
Puristussakka	polttoaineeksi, rehuksi sekä kompostoinnin kautta pellolle
Glyseroli	- energiantuotantoon (poltto hakkeen seassa, pelletin valmistukseen ja biokaasureaktoriin) - jonkin verran on edelleen glyserolin sijoitusongelmia eli kaikelle syntyneelle glyserolille ei ole löytynyt käyttökohdetta
Pesuvesi	levitys pellolle (suoraan tai lannan mukana) tai viemäriin

Kuvissa 16, 17, 18 ja 19 on esitetty RME-biodieselin tuotantoketjun elinkaariset ympäristövaikutukset tuotantovaiheittain, kun on käytetty taloudellista allokointia. Kuvassa 20 on esitetty RME-ketjun uusiutumattoman primäärienergian kulutus tuotantovaiheittain. Liitteessä 3 on esitetty RME:n tuotantoketjun elinkaariset ympäristökuormitukset lukuarvoina taloudelliselle allokoinnille, massa-allokoinnille ja tapaukselle, jossa kaikki kuormitukset on allokoitu biodieselille.

Taloudellista allokaatiota käyttäen RME-tuotannon ilmastonmuutosvaikutus on 110 g/MJ polttoainetta (kuva 16). 56 % ilmastonmuutosvaikutuksesta aiheutuu rypsinviljelyn N₂O-päästöistä. CO₂-päästöistä valtaosa aiheutuu niin ikään viljelystä. Viljelyssä suurimmat CO₂-päästöt aiheutuvat työkoneiden käytöstä. Myös kalkituksesta johtuva fossiilisen hiilidioksidin vapautuminen on merkittävää. Toiseksi suurin ilmastonmuutosvaikutus aiheutuu panostuotannosta eli lannoitteiden ja kalkin valmistuksesta (41 %).



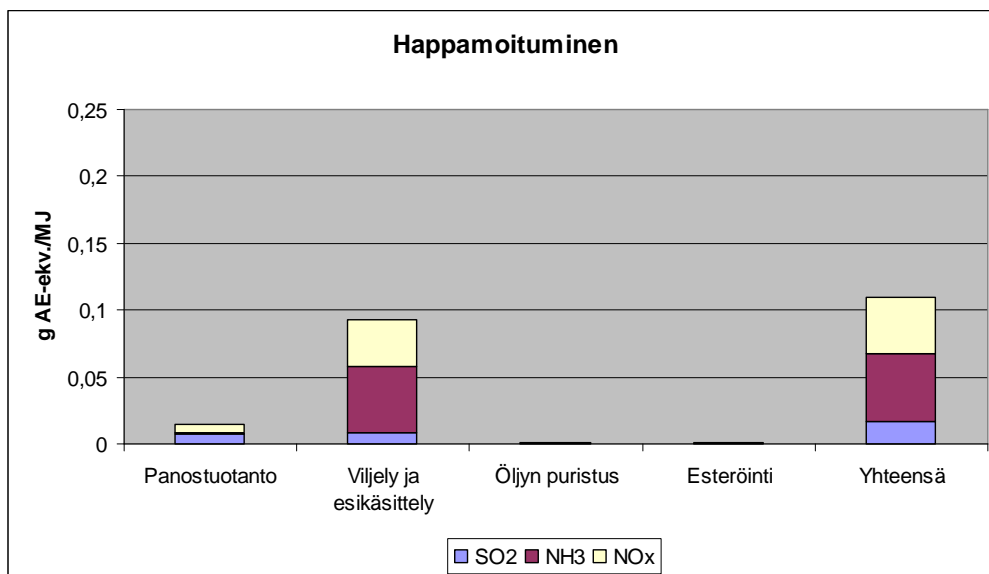
Kuva 16. RME:n valmistusketjun ilmastonmuutokseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.



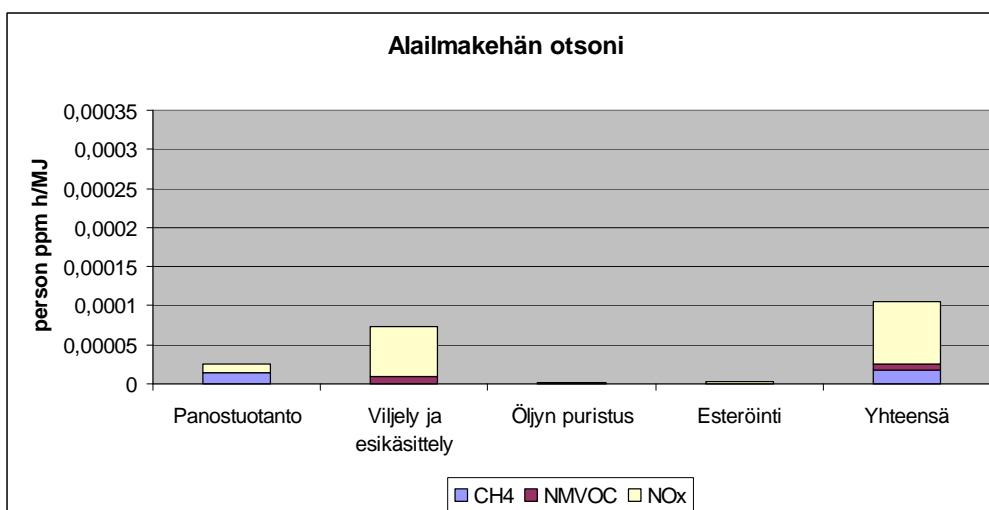
Kuva 17. RME:n valmistusketjun vesistöjen rehevöitymiseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.

Rehevöitymisvaikutusta RME:n tuotannossa aiheuttaa odotetusti eniten rypsin viljely (kuva 17). Typpihuuhtoumien merkitys on jonkin verran fosforihuuhtoumia suurempi. Myös happamoitusvaikutusta dominoi viljelyvaihe (kuva 18). Viljelyn työkoneet aiheuttamat NO_x-päästöt ovat merkittävin yksittäinen tekijä

happamoitusvaikutuksessa yhdessä lohkolta vapautuvien ammoniakkipäästöjen kanssa. Työkoneiden NO_x -päästöt dominoivat myös alailmakehän otsonin muodostumista (kuva 19).

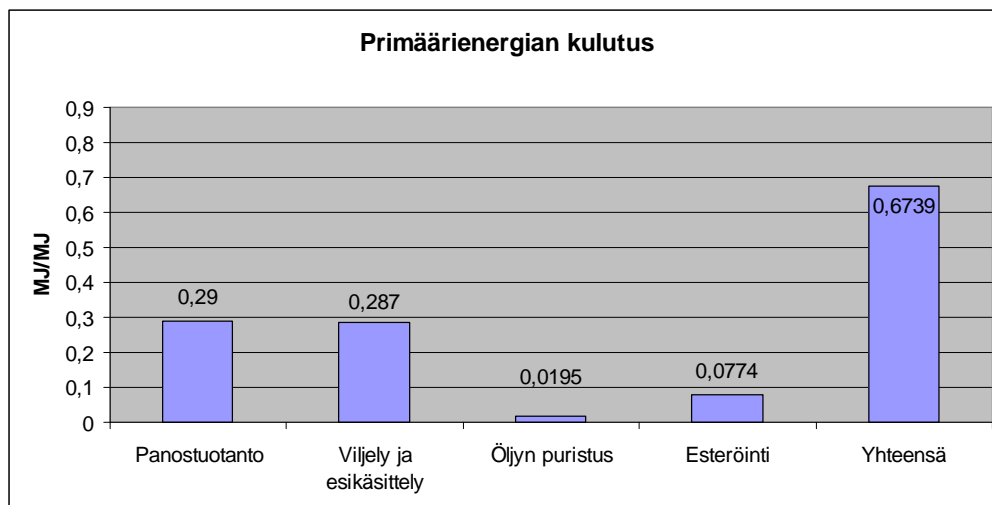


Kuva 18. RME:n valmistusketjun happamoitumiseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.



Kuva 19. RME:n valmistusketjun alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.

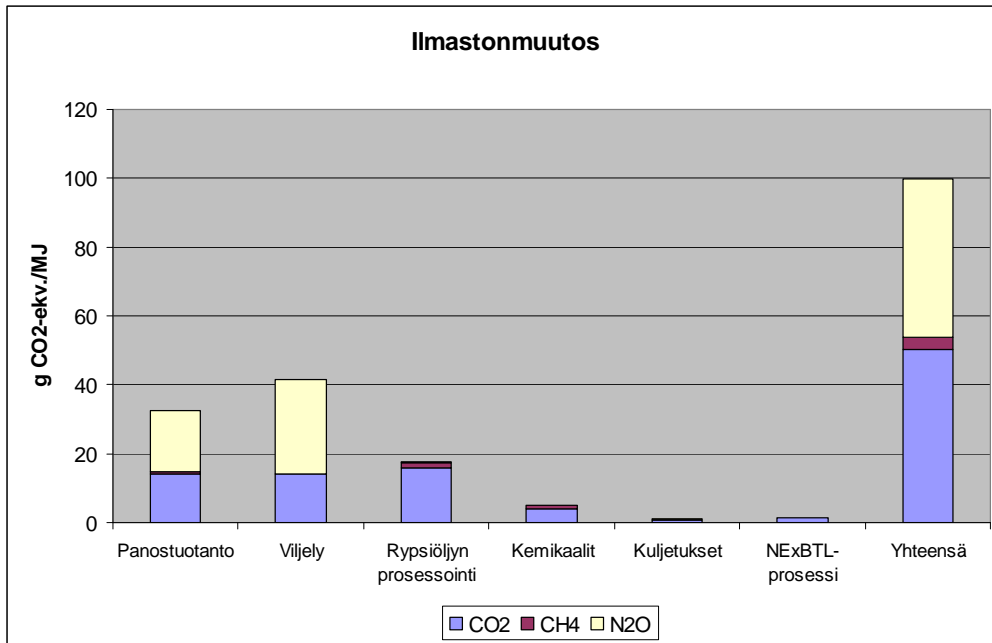
Primäärienergian kulutuksessa panostuotanto ja viljely ovat merkittävimmät (kuva 20). Esteröinnissä käytettävän metanolin tuotanto aiheuttaa suurimman osan esteröinnin primäärienergian kulutuksesta. Samoin rypsiöljyn puristus kuluttaa sähköä ja sitä kautta primäärienergiaa jonkin verran.



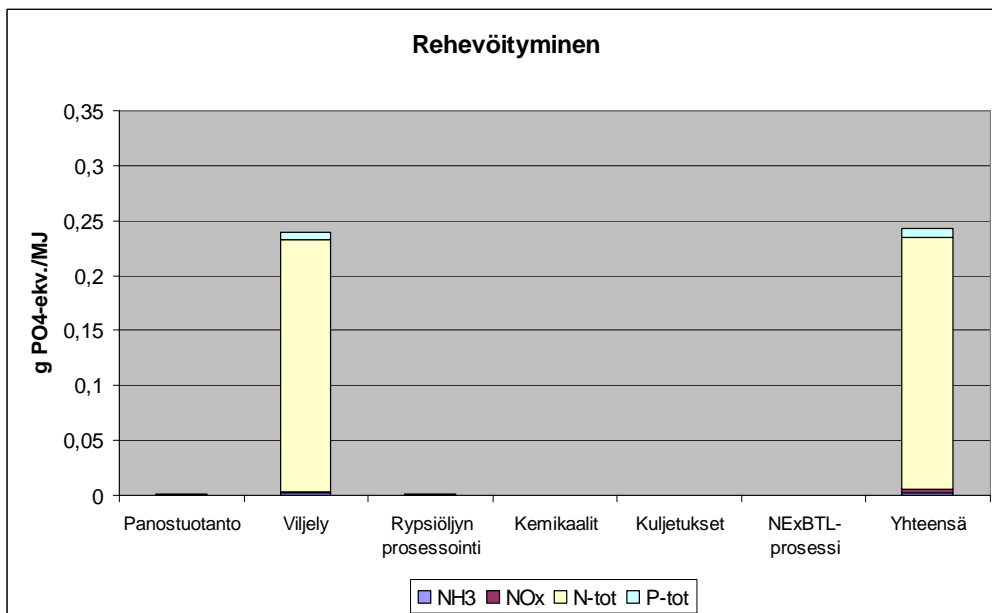
Kuva 20. RME:n valmistusketjun primäärienergian kulutus ketjun vaiheittain.

Kuvissa **21**, **22**, **23** ja **24** on esitetty NExBTL-biodieselin tuotantoketjun elinkaariset ympäristövaikutukset eriteltyinä tuotantovaiheittain, kun on käytetty taloudellista allokointia. Liitteessä 3 on esitetty kuvissa käytetyt lukuarvot taulukoituina. Lisäksi liitteessä 3 on esitetty NExBTL:n elinkaariset ympäristökuormitukset massaallokointia käyttäen ja vertailu fossiilisen dieselin ympäristökuormitukseen. Kuvassa **25** on puolestaan esitetty NExBTL-ketjun uusiutumattoman primäärienergian kulutus tuotantovaiheittain.

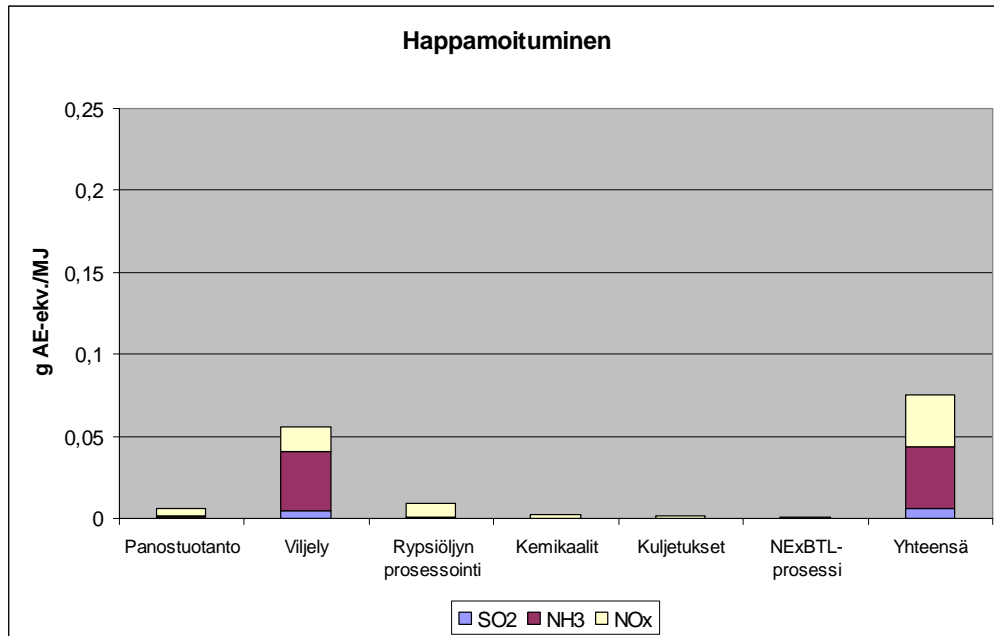
NExBTL:n valmistusketjun ilmastonmuutosvaikutukset painottuvat, samoin kuin edellä RME:n kohdalla, viljelyyn ja panostuotantoon, mutta myös rypsiöljyn prosessointi aiheuttaa merkittävää kuormitusta (kuva 21). Rehevöittävät päästöt puolestaan aiheutuvat lähes yksinomaan viljelyn typpihuuhtoumista (kuva 22). Samoin happamoitumiseen vaikuttavat päästöt painottuvat viljelyyn (kuva 23) ja suurimpana tekijänä ovat maaperän ammoniakkipäästöt. Alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt jakautuvat tasaisemmin koko ketjulle, kuitenkin rypsiöljyn prosessointi ja viljely aiheuttavat näistä suurimman osan (kuva 24).



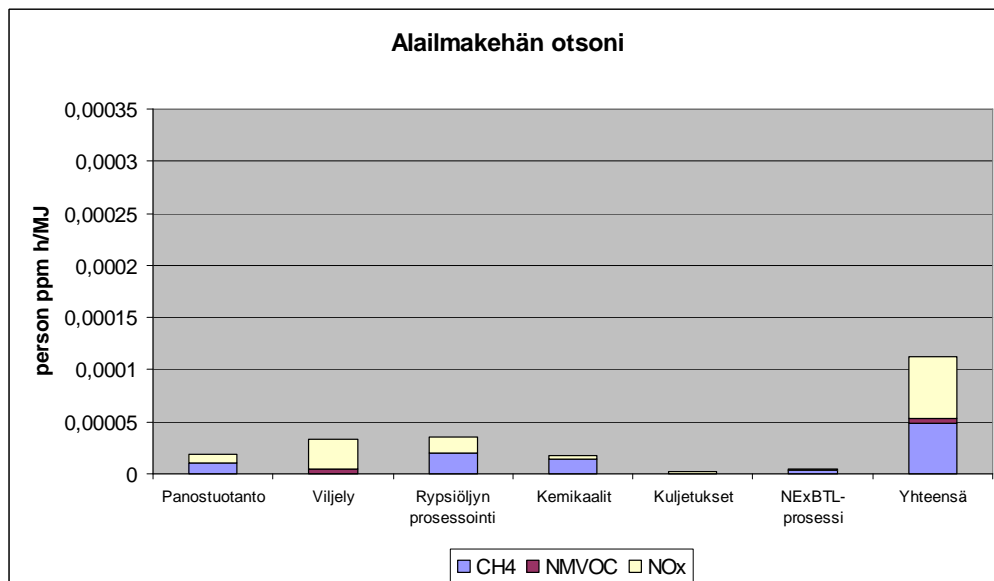
Kuva 21. NExBTL:n valmistusketjun ilmastonmuutokseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.



Kuva 22. NExBTL:n valmistusketjun vesistöjen rehevöitymiseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.

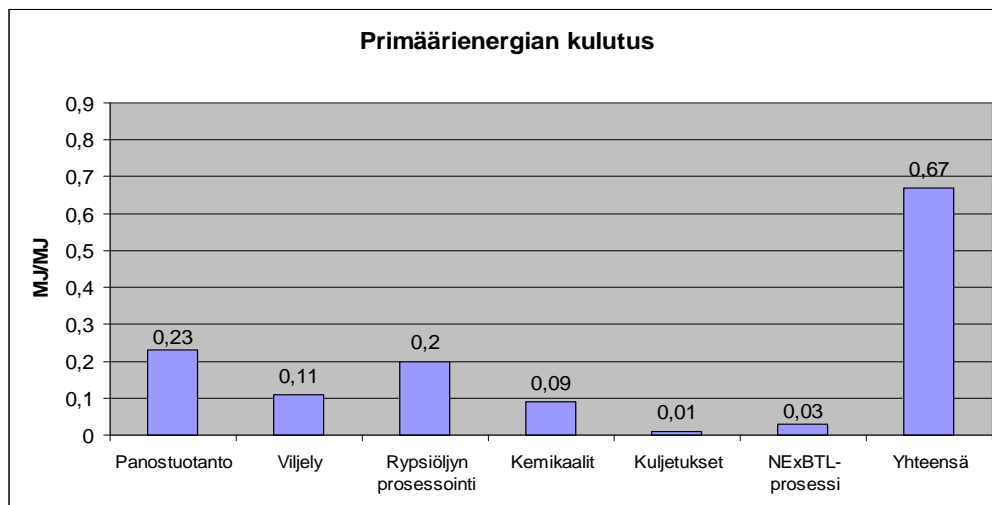


Kuva 23. NExBTL:n valmistusketjun happamoitumiseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.



Kuva 24. NExBTL:n valmistusketjun alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt ketjun vaiheittain.

Primäärienergian kulutuksesta suurin osa aiheutuu panostuotannosta ja rypsiöljyn prosessoinnista (kuva 24). Myös viljelyyn käytettävät työkonet ja kemikaalien valmistus kuluttavat huomattavia määriä primäärienergiaa.

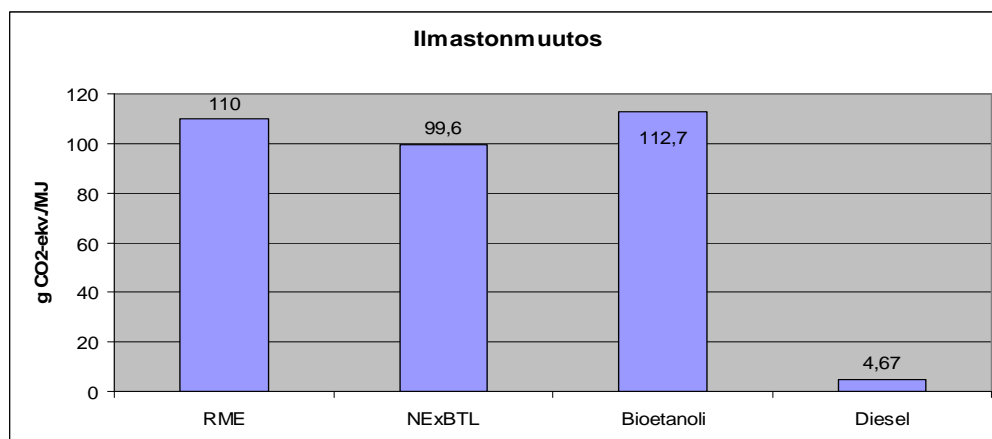


Kuva 25. NExBTL:n valmistusketjun primäärienergian kulutus ketjun vaiheittain.

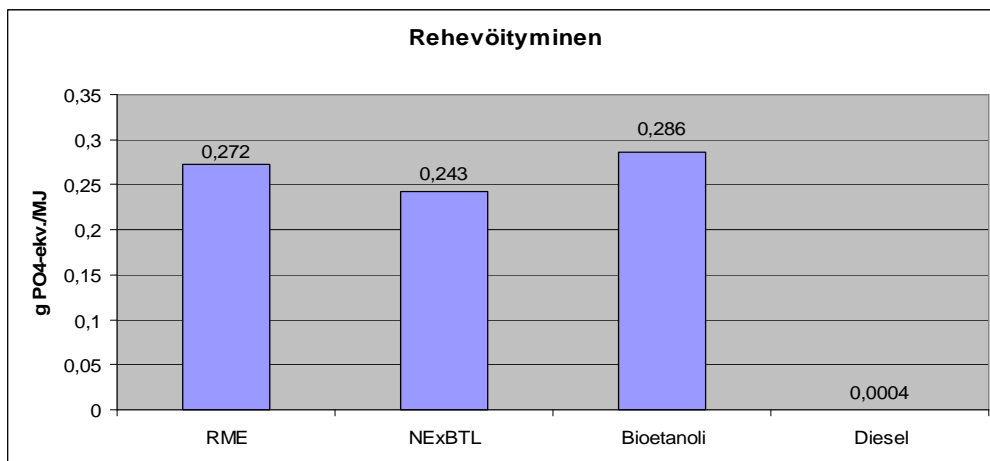
5.1.3. Nestemäisten polttoaineiden vertailu

Kuvissa 26, 27, 28, 29 ja 30 on vertailtu nestemäisten biopolttoaineiden ja fossiilisen dieselin elinkaarisia ympäristövaikutuksia tuotantoketjujen osalta, kun RME- ja NExBTL-ketjuilla on käytetty taloudellista allokointia ja bioetanoliketjussa allokointi on tehty päätuotteelle. Käyttö moottoreissa ei sisälly vertailuun.

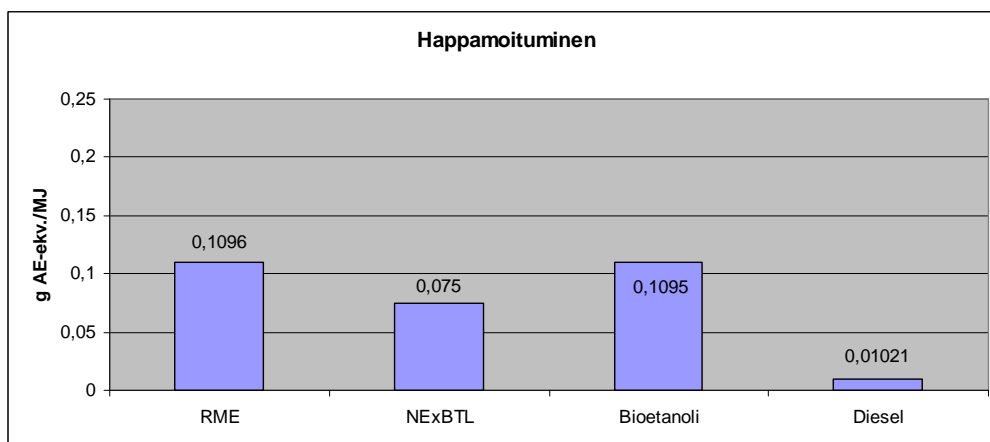
Kuvista voidaan nähdä, että bioetanolin tuotantoketjun ympäristövaikutukset ovat haitallisimmat verrattuna muihin nestemäisiin polttoaineisiin. Biodieseleistä RME:n tuotantoketju aiheuttaa hieman suuremmat ilmastonmuutos-, rehevöitymis- ja happamoitumisvaikutukset kuin NExBTL:n tuotantoketju, mutta alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavien päästöjen osalta tilanne on toisinpäin. Fossiilisen dieselin tuotantoketjun ympäristövaikutukset jäävät kaikissa ympäristövaikutusluokissa biopolttoaineita selvästi pienemmiksi. Myös primäärienergian kulutus on fossiilisen dieselin tuotantoketjulla biopolttoaineita pienempi.



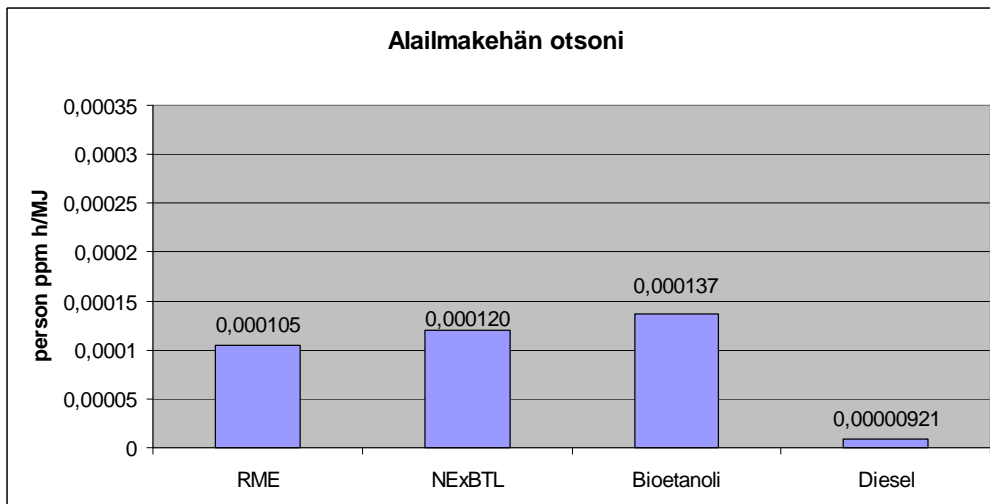
Kuva 26. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen ilmastonmuutosvaikutuksen vertailu.



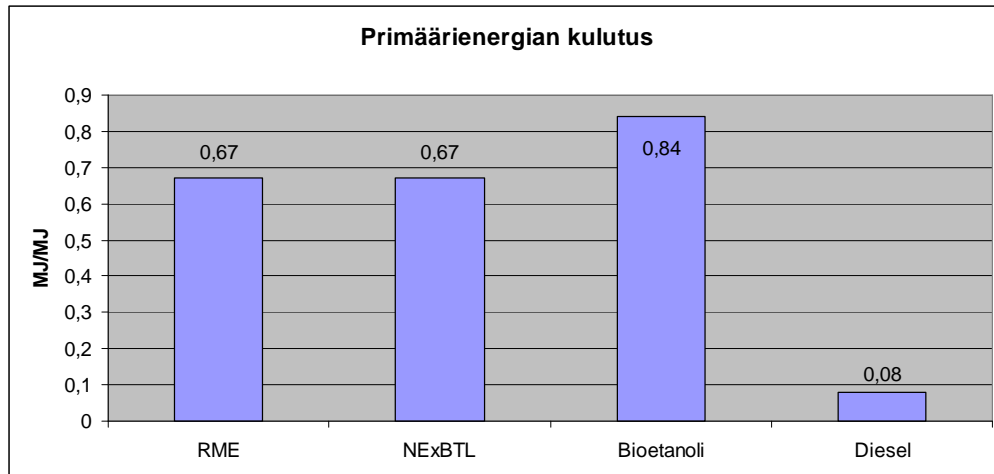
Kuva 27. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen vesistöjen rehevöitymisvaikutusten vertailu.



Kuva 28. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen happamoitumisvaikutusten vertailu.

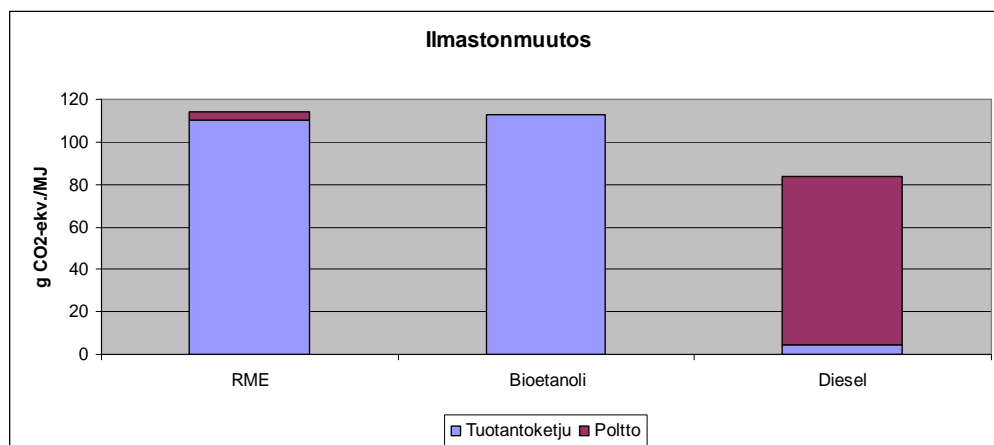


Kuva 29. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen alailmakehän otsonin muodostumisvaikutusten vertailu.

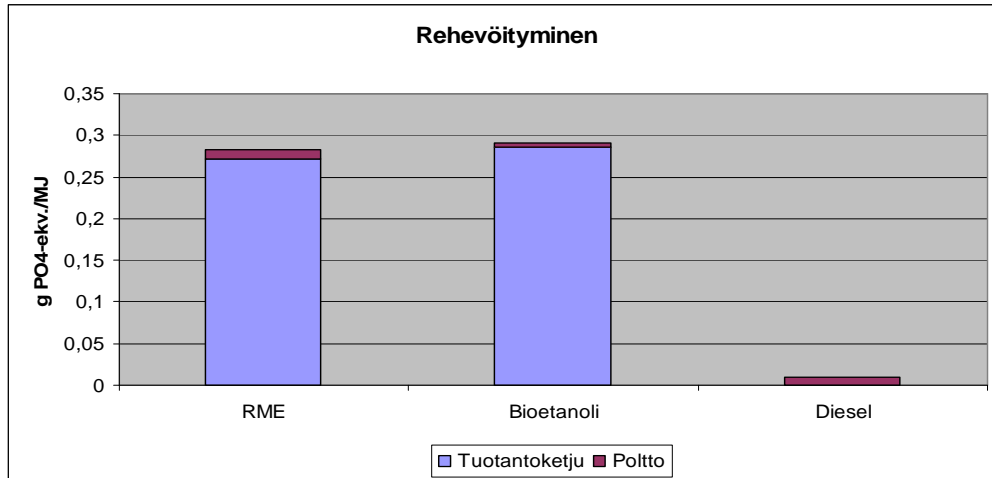


Kuva 30. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen primäärienergian kulutusten vertailu.

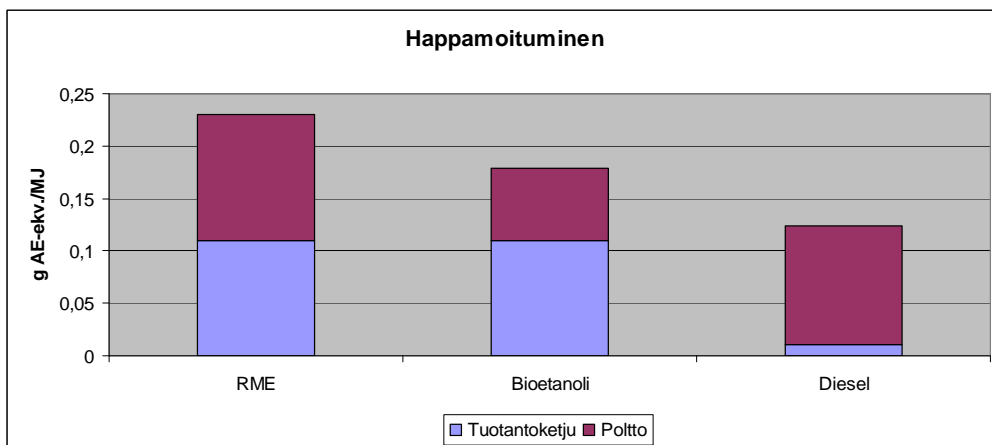
Kuvissa **31**, **32**, **33** ja **34** on vertailtu RME:n, bioetanolin ja fossiilisen dieselin elinkaarisia ympäristökuormituksia käyttö mukaan lukien. Myös näistä kuvista on havaittavissa, että fossiilinen diesel aiheuttaa vähemmän kuormitusta ympäristölle biodieseliin ja bioetanoliin verrattuna. Kun otetaan käyttövaiheen päästöt mukaan vertailuun, huomataan, että RME-ketjun elinkaariset ympäristökuormitukset ovat suurimmat lukuun ottamatta rehevöitymisluokkaa, jossa NExBTL-ketjun vaikutukset ovat suurimmat.



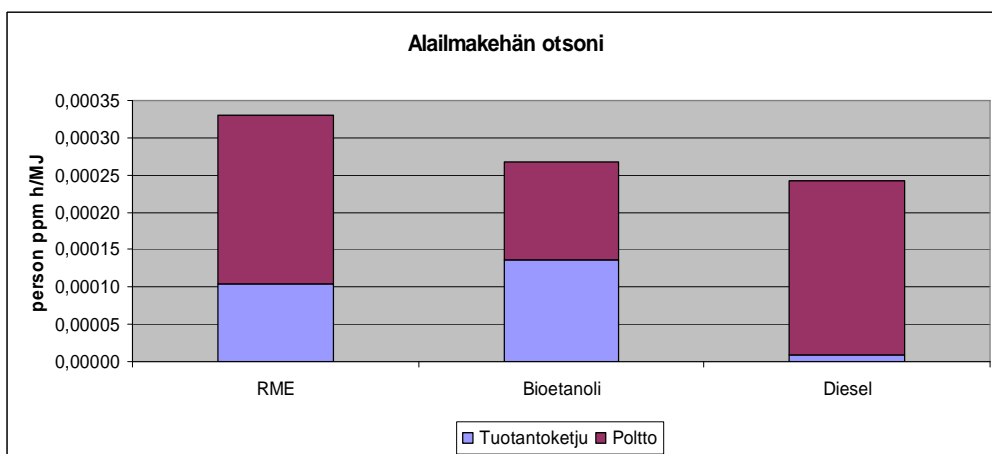
Kuva 31. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen ilmastonmuutosvaikutuksen vertailu dieseliin käyttö mukaan lukien.



Kuva 32. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen vesistöjen rehevöitymisvaikutusten vertailu dieseliin käyttö mukaan lukien.



Kuva 33. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen happamoitumisvaikutusten vertailu dieseliin käyttö mukaan lukien.



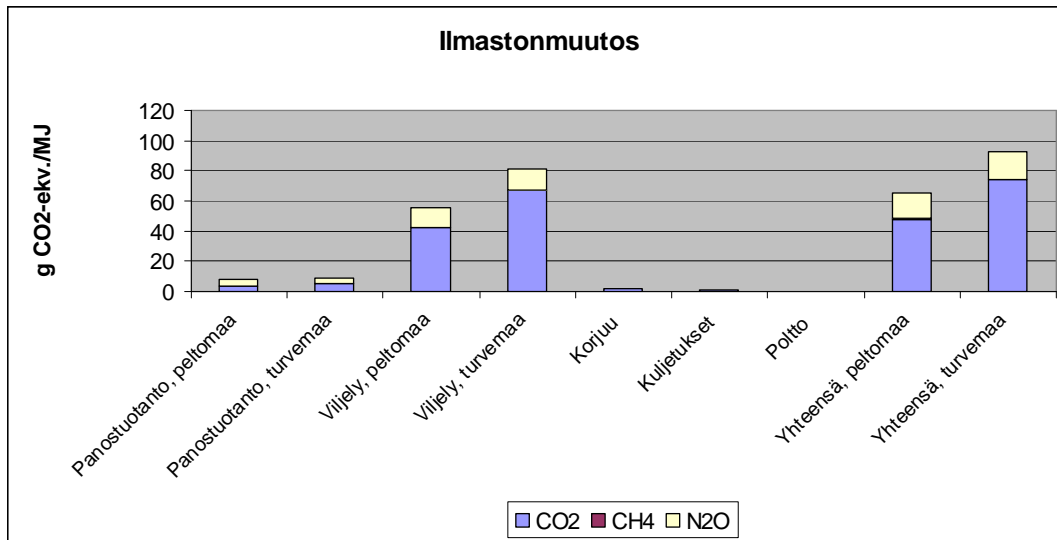
Kuva 34. Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoketjujen alailmakehän otsonin muodostumisvaikutusten vertailu dieselin käyttö mukaan lukien.

5.2. Kiinteät biopolttoaineet

5.2.1. Ruokohelpi

Ruokohelpiketjun päästöt ympäristövaikutusluokittain on esitetty kuvissa **35, 36, 37** ja **38**, ja primäärienergian kulutus kuvassa **39**. Kuvissa on vertailtu viljelyä peltomailla ja turvemailla, koska näiden päästöissä on pieniä eroja johtuen mm. turvemaiden vaatimasta suuremmasta kalkitusmäärästä. Viljely pitää sisällään työkoneiden polttoaineen kulutuksen, maaperän ammoniakki- ja typpioksiduulipäästöt sekä kalkin käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Rehevöittävässä päästöissä on huomioitu myös ruokohelpin viljelystä aiheutuvat typpi- ja fosforihuuhtoumat. Korjuun osalta on käytetty toisen vuoden satoarvoja ja kuljetuksissa 0,7 metrin suurkantipaaleille laskettuja arvoja 70 kilometrin kuljetusmatkalla. Lisäksi oletuksena on, että paluukuormat ovat tyhjiä. Kaikki päästöarvot on esitetty taulukoituina liitteessä 4. Tulosten tulkitsemisessa on huomioitava, että viljelyn osalta käytetyn lähtöaineiston otosjoukko on pieni, erityisesti turvemaaviljelyn osalta. Tämä ja muut edellä mainitut tietolähteisiin liittyvät epävarmuustekijät rajoittavat pitkälle menevien johtopäätösten vetämistä tulosten pohjalta.

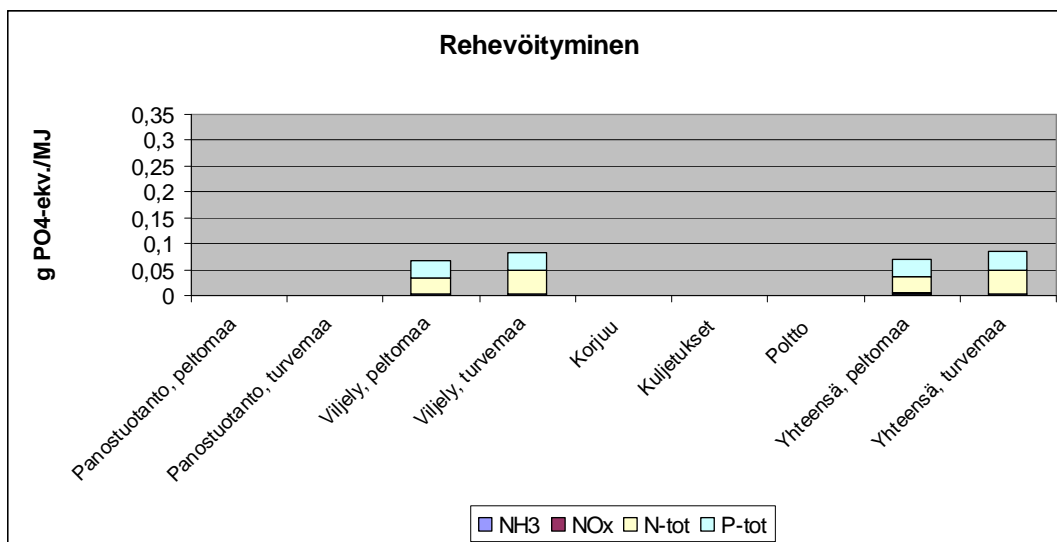
Ilmastonmuutosvaikutuksen osalta (kuva 35) päästöjä hallitsevat viljelyn päästöt, muiden ketjun vaiheiden ollessa lähes merkityksettömiä. Viljelyn aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä valtaosa aiheutuu ruokohelpiviljelmän kalkitsemisesta sen perustamisvaiheessa. Turvemaan alhaisemman pH:n takia entisillä turvetuotantoalueilla kalkkia on käytettävä enemmän kuin peltomaalla, mikä näkyy suurempina kasvihuonekaasupäästöinä turvemaaviljelyssä. Myös käytetyt lannoitetyypit ja -määrät olivat erilaisia laskemissa pohjatietoina käytetyillä pelto- ja turvemaaviljelmillä. Fosforilannoitetta käytettiin turvemaaviljelmillä kahtena ensimmäisenä vuonna keskimäärin enemmän ja seuraavina vuosina hieman vähemmän kuin peltomaaviljelmillä. Typeä lisättiin perustamisvuonna turvemaaviljelmillä ja peltomaaviljelmillä saman verran, mutta seuraavina vuosina turvemaaviljelmillä typeä lisättiin keskimäärin enemmän kuin peltomaaviljelmillä.



Kuva 35. Ruokohelpiketjun ilmastonmuutokseen vaikuttavat päästöt.

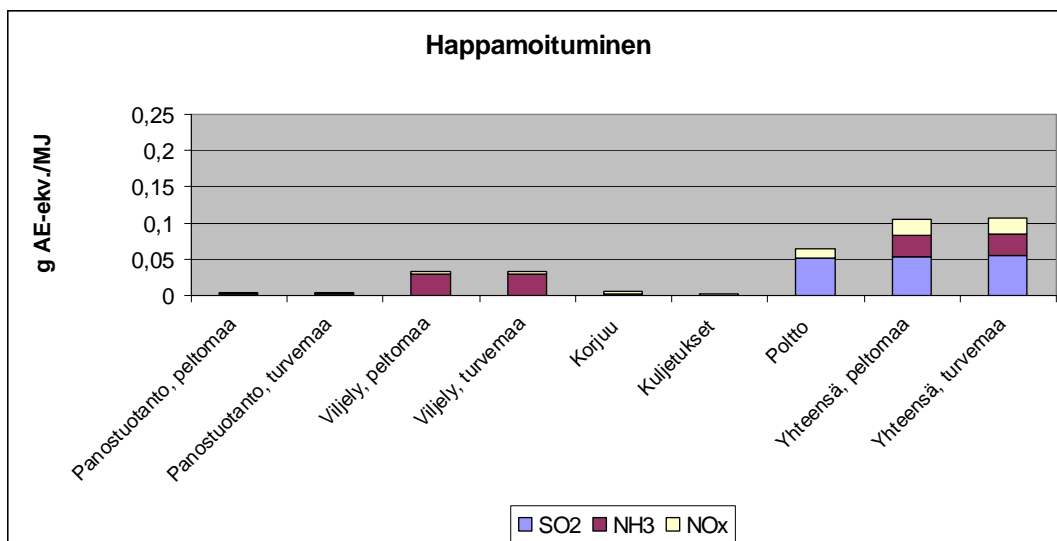
Ruokohelpin viljelyn osalta elinkaariarvioinneissa huomioitiin vain typpioksiduuli- ja ammoniakkipäästöt. Ruokohelpiviljelmillä voi kuitenkin syntyä myös metaanipäästöjä, joita ei tässä tutkimuksessa voitu huomioida, koska orgaanisten viljelymaiden metaanipäästöistä ei ollut kattavasti saatavilla luotettavia arvioita. Turvetuotannosta poistetuilla alueilla sijaitsevien ruokohelpiviljelmien osalta Hyvönen ym. (2009) ovat suorittaneet metaanipäästömittauksia Linnansuon 15 hehtaarin ruokohelpiviljelmällä. Kyseinen Linnansuon alue oli turvetuotannossa vuosina 1978-2001, jonka jälkeen alueella on viljelty ruokohelpeä. Hyvönen ym. (2009) vuosina 2004-2007 suorittamien mittausten perusteella ruokohelpiviljelmän vuosittaiset metaanipäästöt olivat 4 kg CH₄/ha. Keskisato kyseisillä viljelmillä oli 4 840 kg/ha. Kyseisellä alueella suoritettiin myös CO₂-mittauksia, joiden perusteella havaittiin, että ruokohelpiviljelämä toimi vuositasolla hiilidioksidinieluna (Shurpali ym., 2009).

Myös valtaosa rehevöittävästä päästöistä (kuva 36) aiheutuu ruokohelpin viljelyvaiheessa. Turvemaaviljelyn rehevöittävät päästöt ovat hieman peltomaaviljelyn päästöjä suuremmat, koska lähdetietoina käytetyillä turvemaaviljelmillä käytettiin hieman suurempia lannoitemääriä.



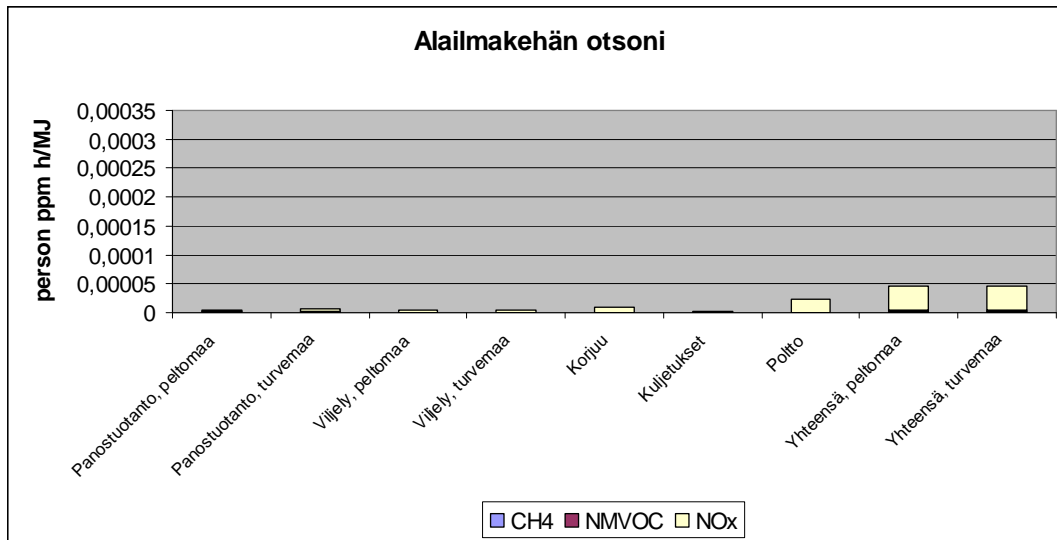
Kuva 36. Ruokohelpiketjun rehevöittävät päästöt.

Happamoitusvaikutuksen (kuva 37) suhteen ruokohelpiketjun merkittävin vaihe on ruokohelpin poltto. Ruokohelpin poltossa syntyvistä happamoitumista aiheuttavista päästöistä merkittävin on rikkidioksidi. Poltossa syntyy myös typen oksideita. Viljelyn happamoittavat päästöt aiheutuvat maaperän ammoniakkipäästöistä.



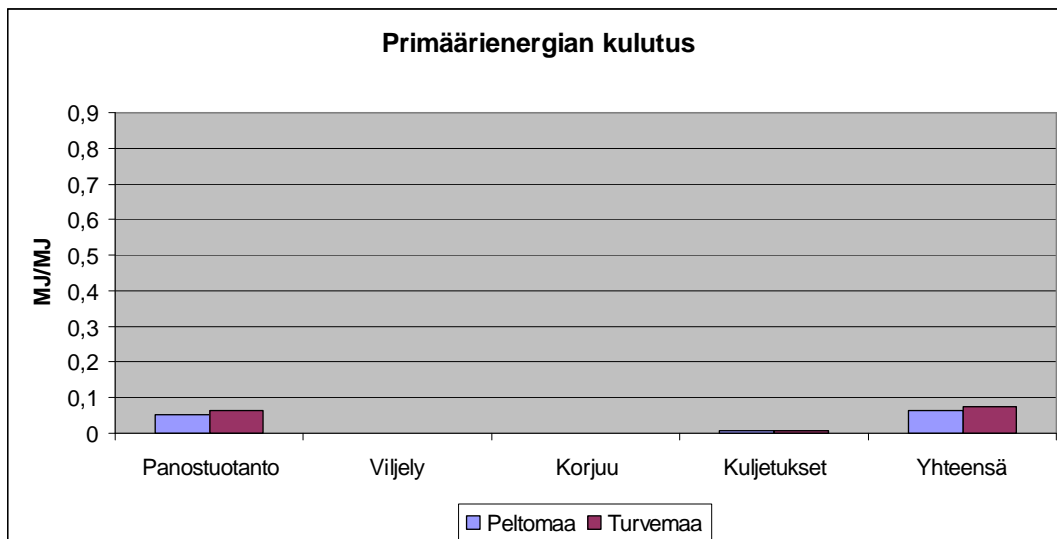
Kuva 37. Ruokohelpiketjun happamoittavat päästöt.

Alailmakehän otsonin muodostumiseen (kuva 38) vaikuttavista päästöistä merkittävimpiä ovat ruokohelpin tuotannosta ja käytöstä aiheutuvat typpioksidipäästöt, joista noin puolet muodostuu ruokohelpin poltossa. Myös viljely- ja korjuuvaiheista aiheutuu typpioksidipäästöjä. Alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt ovat kuitenkin hyvin pienet verrattuina nestemäisiin biopolttoaineisiin.



Kuva 38. Ruokohelpiketjun alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt.

Ruokohelpiketjun aikana kuluneesta primäärienergiasta (kuva 39) merkittävin osuus käytetään lannoitteiden ja kalkin valmistukseen. Erot peltomaaviljelyn ja turvemaaaviljelyn välillä johtuvat eroavista kalkitus- ja lannoitusmääristä ja käytetyistä lannoitteista.



Kuva 39. Ruokohelpiketjun primäärienergian kulutus.

Ruokohelpeä ei yleensä polteta yksin, jonka vuoksi polton päästöt on arvioitu myös seospoltolle turpeen ja hakkeen kanssa, kun ruokohelpin osuus on 2 tai 5 % (taulukko 30). Tällöin polton päästöt noudattavat kuitenkin hyvin pitkälti pääpolttoaineesta aiheutuvia päästöjä, koska ruokohelpin osuus poltossa on niin pieni. Lisäksi taulukossa 30 esitetyt päästöt ovat vain suuntaa-antavia, koska esimerkiksi NO_x- ja CO-päästöihin vaikuttavat suuresti polttotapahtuman ominaisuudet, kuten lämpötila.

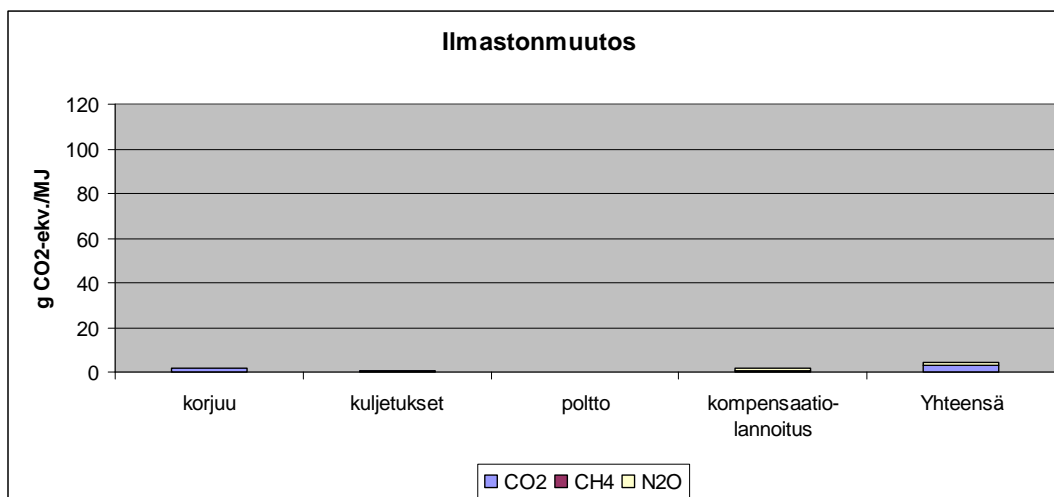
Taulukko 30. Keskimääräiset päästöt ruokohelpin (2-5 %) ja hakkeen sekä ruokohelpin (2-5 %) ja turpeen poltolle.

	Turve ja ruokohelpi		Hake ja ruokohelpi	
	g/MJ, 2 %	g/MJ, 5 %	g/MJ, 2 %	g/MJ, 5 %
CO ₂	103,88	100,70	0,00	0,00
CO	20,82	20,19	0,02	0,02
NO _x	0,00	0,00	0,09	0,09
CH ₄	3,24	3,14	0,00	0,00
N ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₂	0,15	0,15	0,00	0,01

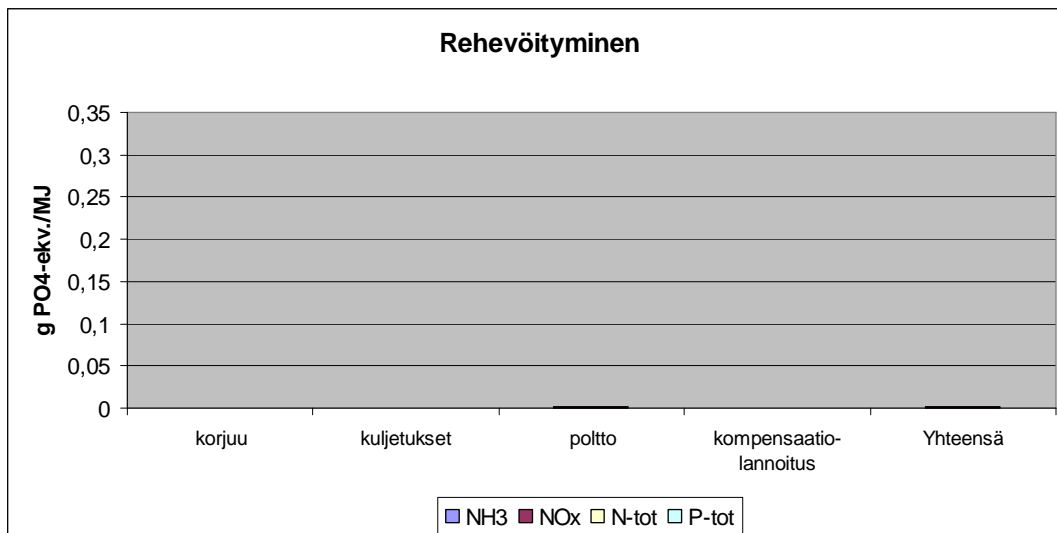
5.2.2. Viljan olki sekä rypsin ja rapsin korsi

Kuvissa **40**, **41**, **42** ja **43** on esitetty olkiketjun päästöt ympäristövaikutusluokittain. Kuvista voidaan nähdä, että olkiketjun aiheuttamat päästöt ovat hyvin marginaaliset verrattuna muihin tässä tutkimuksessa tutkittuihin biopolttoaineisiin. Kuvassa **44** on puolestaan esitetty olkiketjun primäärienergian kulutus. Korjuussa on mukana oljen karhotus, paalaus ja lastaus täysperävaunuyhdistelmään, jolla paalit kuljetetaan polttolaitokselle. Eri paalivaihtoehdoista on kuljetusten päästöjen tarkasteluun otettu 0,7 metrin suurkanttipaalit. Kaikki olki- sekä korsiketjujen päästöt ja eri kuljetusvaihtoehtojen päästöt on esitetty liitteessä 5.

Kuvasta 40 nähdään, että ilmastonmuutokseen vaikuttavia päästöjä syntyy koko ketjun aikana lukuun ottamatta polttoa, koska oljen kasvu sitoo saman määrän hiilidioksidia kuin sen poltossa vapautuu. Rehevöittävästä päästöistä suurin osa syntyy oljen poltosta NO_x-päästöjen muodossa (kuva 41). Tässä on kuitenkin huomioitava, että kompensatiolannoituksen osalta on tarkasteltu vain lannoitteiden valmistuksen päästöjä, eikä lannoitteiden käytön mahdollisesti aiheuttamia rehevöittäviä päästöjä ole huomioitu.

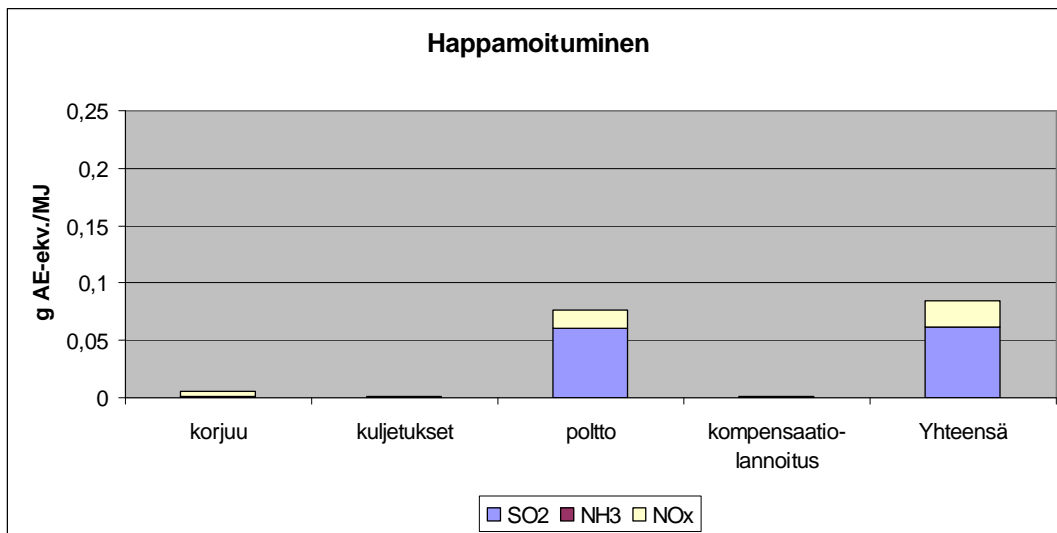


Kuva 40. Olkiketjun ilmastonmuutokseen vaikuttavat päästöt.

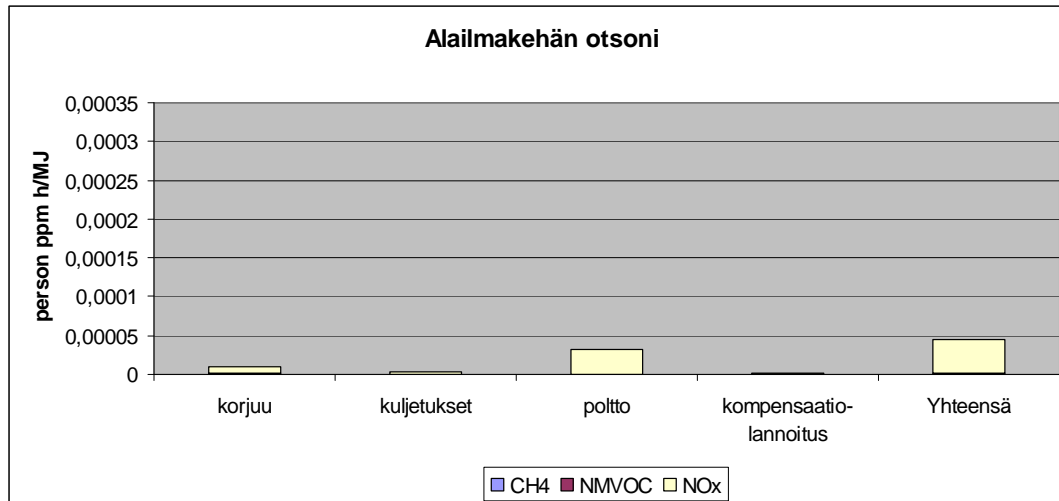


Kuva 41. Olkiketjun rehevöittävät päästöt.

Olkiketjun happamoittavat päästöt syntyvät pääasiassa poltosta (kuva 42) oljen sisältämän rikin ja typen vuoksi. Myös alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavista päästöistä suurin osa on peräisin oljen poltosta typen oksidien muodossa (kuva 43).

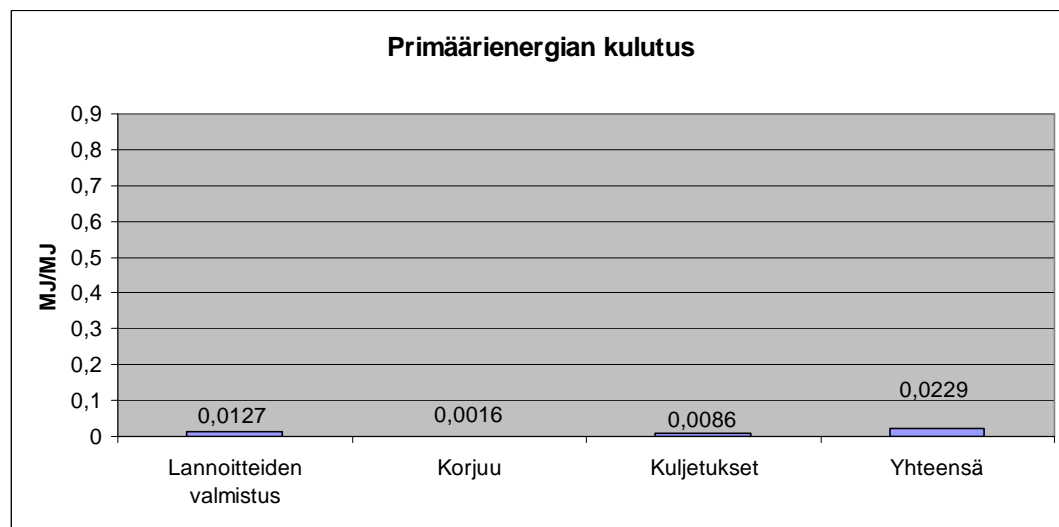


Kuva 42. Olkiketjun happamoittavat päästöt.



Kuva 43. Olkiketjun alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt.

Kuvasta 44 nähdään, että suurin osa olkiketjun primäärienergian kulutuksesta aiheutuu kompensaa-tiolannoitukseen käytettävien lannoitteiden valmistuksesta. Toiseksi paljon energiaa kuluu oljen kuljetuksiin polttolaitoksille.



Kuva 44. Olkiketjun primäärienergian kulutus.

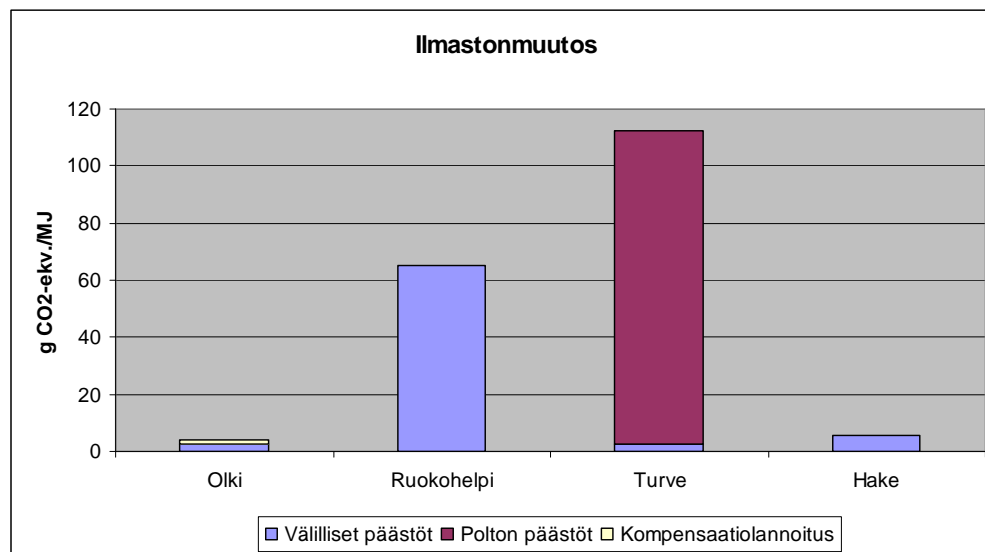
Kuten ruokohelpeä, olkeakaan ei Suomessa juuri polteta yksin, jonka vuoksi päästöt on laskettu myös seospoltolle turpeen ja hakkeen kanssa, kun oljen ja korren osuus on 2 tai 5 % (taulukko 31). Myös tässä on huomioitava, että polton päästöt noudattavat kuitenkin hyvin pitkälti pääpoltoaineesta aiheutuvia päästöjä ja, että taulukossa 31 esitetyt päästöt ovat vain suuntaa-antavia, koska esimerkiksi NO_x- ja CO-päästöihin vaikuttavat suuresti polttotapahtuman ominaisuudet, kuten lämpötila.

Taulukko 31. Keskimääräiset päästöt oljen (2-5 %) ja hakkeen sekä oljen (2-5 %) ja turpeen poltolle.

	Turve ja olki		Hake ja olki	
	g/MJ, 2 %	g/MJ, 5 %	g/MJ, 2 %	g/MJ, 5 %
CO ₂	103,88	100,70	0,00	0,00
CO	20,84	20,22	0,03	0,05
NO _x	0,00	0,00	0,09	0,09
CH ₄	3,24	3,14	0,00	0,00
N ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₂	0,15	0,15	0,00	0,01

5.2.3. Kiinteiden polttoaineiden vertailu

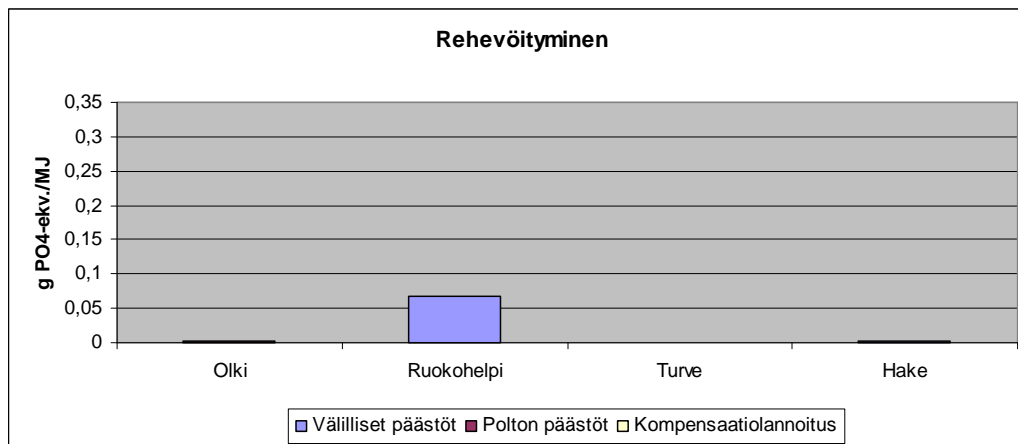
Kuvissa 45, 46, 47 ja 48 on vertailtu ruokohelpi- ja olkiketjuja turve- ja metsätähdehakeketjuihin ympäristövaikutusluokittain. Kuvassa 49 on verrattu kiinteiden polttoaineiden primäärienergian kulutusta. Ruokohelmin osalta vertailuun on otettu viljely peltomaalla, koska peltoviljelyn kyselytutkimusaineisto oli laajempi ja samalla myös luotettavampi kuin turvemaiden aineisto. Kuvasta 45 nähdään, että ruokohelpiketjun välilliset päästöt ovat ylivoimaisesti suurimmat verrattuna muihin kiinteisiin polttoaineisiin. Suurimmat polton päästöt ovat puolestaan turpeella, koska muut vertailussa olevat polttoaineet luokitellaan hiilineutraaleiksi, eikä niiden poltosta muodostu juurikaan metaania tai typpioksiduulia.



Kuva 45. Kiinteiden biopolttoaineiden tuotantoketjujen ilmastonmuutosvaikutuksen vertailu, käyttö mukaan lukien.

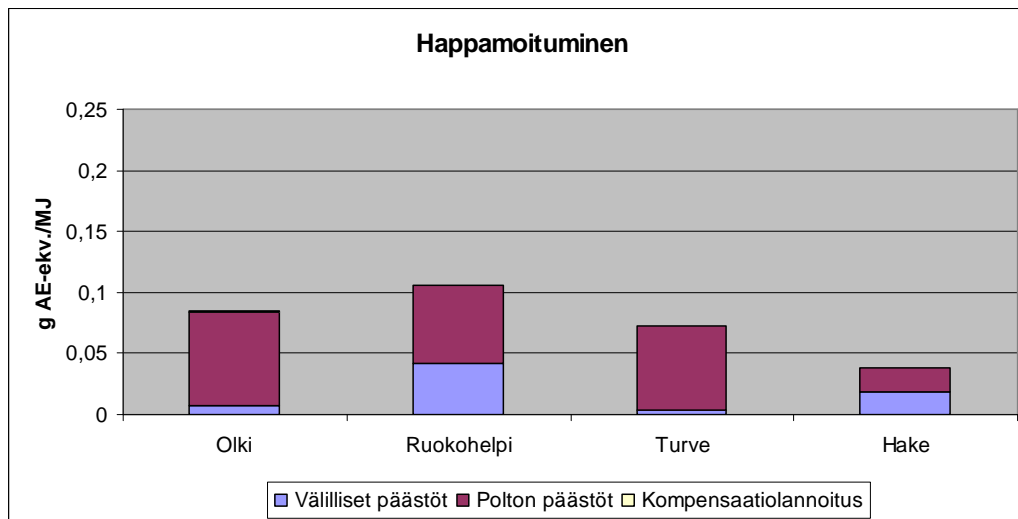
Kuvasta 46 nähdään, että myös ruokohelmin rehevöittävät päästöt ovat ylivoimaisesti suurimmat verrattuna muihin vertailtuihin polttoaineisiin. Syynä tähän on ruokohelmin viljelystä aiheutuvat typpihuuhtoumat. Oljen osalta laskelmiin ei tosin otettu mukaan oljen korjuun seurauksena tehtävän kompensaatiolannoituksen aiheuttamia ravinnehuuhtoumia, joka voisi lisätä oljen rehevöittäviä päästöjä. Myös turvetuotanto aiheuttaa typpi- ja fosforihuuhtoumia, koska suomaiden kuivattamisen seurauksena orgaanisen aineksen hajoaminen kiihtyy ja ravinteita huuhtoutuu vesistöihin enemmän.

kuin luonnontilaisilta suomalaisilta (esim. Kløve, 2001). Maankäytön muutosten aiheuttamia ravinteiden tai orgaanisten aineiden lisähuuhtoumia ei tässä tutkimuksessa ole tarkasteltu, koska käyppiä malleja niiden arvioimiseen ei ole kattavasti saatavilla. Esimerkiksi peltomaiden ja turvemaiden viljelylohkojen maankäytön muutosten mahdollisia vaikutuksia ravinnehuuhtoumiin ei pystytä luotettavasti arvioimaan.



Kuva 46. Kiinteiden biopolttoaineiden tuotantoketjujen vesistöjen rehevöitymisvaikutusten vertailu, käyttö mukaan lukien.

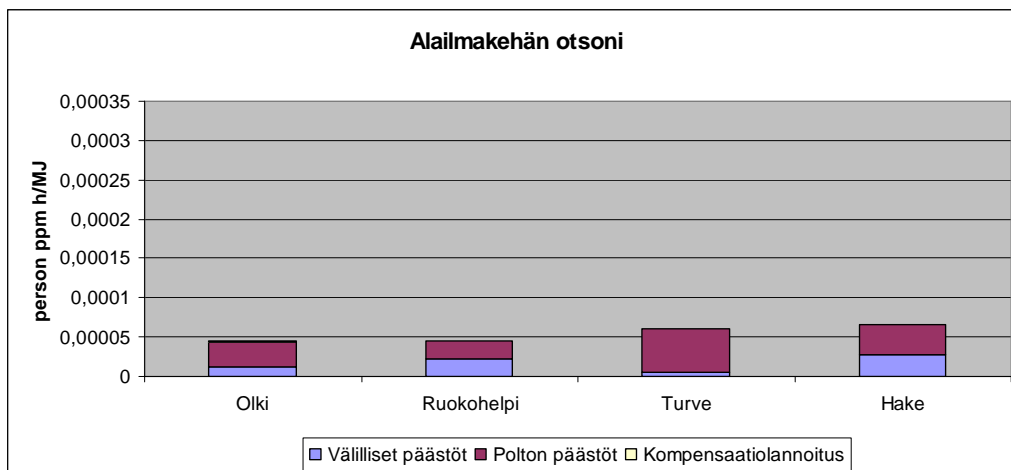
Hakeketjun happamoittavat päästöt ovat selvästi alhaisemmat ja ruokohelpiketjun suuremmat kuin muiden vertailtujen polttoaineiden (kuva 47). Happamoittavista päästöistä suurin osa muodostuu polton päästöistä rikki- ja typpioksidien muodossa, joita hakkeen poltosta muodostuu vähemmän kuin muilla vertailupolttoaineilla.



Kuva 47. Kiinteiden biopolttoaineiden tuotantoketjujen happamoitusvaikutusten vertailu, käyttö mukaan lukien.

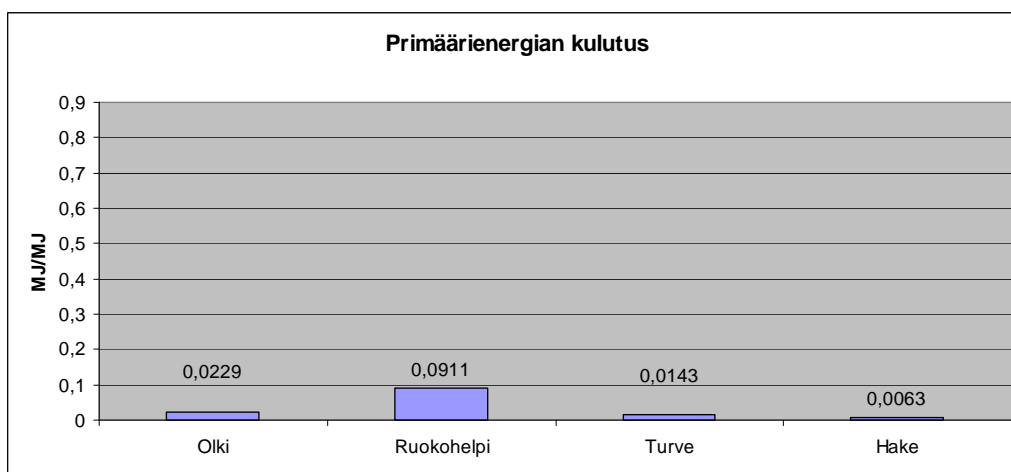
Alailmakehän otsonia muodostavien päästöjen määrä on kaikilla vertailuilla polttoaineilla samaa suuruusluokkaa (kuva 48), mutta hakkeella nämä ovat hieman

suuremmat kuin muilla. Alailmakehän otsonia muodostavia päästöjen suurin aiheuttaja näissä polttoaineketjuissa ovat metaani ja typen oksidit.



Kuva 48. Kiinteiden biopolttoaineiden tuotantoketjujen alailmakehän otsonin muodostumisvaikutusten vertailu, käyttö mukaan lukien.

Ruokohelpiketjun primäärienergian kulutus on huomattavasti suurempi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden (kuva 49). Tämä johtuu pääasiassa ruokohelpin viljelyyn käytettävistä lannoitteista ja kalkista, joiden valmistus kuluttaa paljon energiaa.



Kuva 49. Kiinteiden biopolttoaineiden tuotantoketjujen primäärienergian kulutusten vertailu.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1. Nestemäiset biopolttoaineet

Kotimaisista primääriraaka-aineista valmistettu bioetanoli ja biodiesel eivät nykyisillä menetelmillä tuotettuina olisi ympäristövaikutuksiltaan olennaisesti fossiilisia poltonesteitä parempia, koska matkalla raaka-aineista käyttövalmiiksi polttoaineeksi

kertyy biopolttoaineketjuissa ympäristövaikutuksia paljon enemmän kuin fossiilisten polttoaineiden ketjuissa. Eniten ympäristövaikutuksien kertymää kasvattaa kasvintuotanto. Esimerkiksi bioetanoliketjun ilmastonmuutosvaikutuksesta noin 50 % ja vesistöjen rehevöitymisvaikutuksesta yli 90 % aiheutuu kasviraaka-aineen tuotannosta. Fossiilisen primäärienergian kulutukseen vaikuttavat myös ketjujen jalostusprosessit ja panostuotanto.

Vertailusta huomataan, että biopolttonesteiden happamoitusvaikutus ja alailmakehän otsonin muodostumisvaikutus on noin 5-10 -kertainen, ilmastonmuutosvaikutus noin kaksikymmentäkertainen, ja vesistöjen rehevöitymisvaikutus monisatakertainen fossiilisen dieselin vastaavaan vaikutukseen verrattuna, kun vertailussa otetaan huomioon vain valmistusketjun aiheuttamat päästöt. Fossiilista primäärienergiaa kuluu lämpöarvoon suhteutettuna biopolttonesteiden valmistuksessa 5-10 -kertainen määrä maaöljypohjaisen dieselin valmistamiseen verrattuna. Valmistusketjujen suuremmat päästöt söisivät nestemäisten peltobiopolttoaineiden käytöllä saavutettavan ympäristöedun käytännössä kokonaan, ja kiinteiden polttoaineidenkin edusta suuren osan. Kuvaan tulisi lisäksi vesistöjen rehevöitymisvaikutus, jonka vähentäminen on asiantuntija-arvioissa asetettu tärkeydessään jopa ilmastonmuutosvaikutuksen edelle (Nissinen ym., 2005).

Kun otetaan valmistuksen ympäristökuormitusten lisäksi huomioon polttoaineiden käytössä syntyvät päästöt, ovat ympäristövaikutusten suhteet biopolttonesteille myönteisempiä. Biopolttonesteiden ympäristövaikutukset eivät kuitenkaan ole tällöinkään olennaisesti maaöljydieselillä tai bensiinillä pienempiä. Maaöljypohjaisen dieselin ilmastonmuutosvaikutus on käyttö huomioiden likimain sama kuin RME biodieselin ja noin 70 % bioetanolin ilmastonmuutosvaikutuksesta. Maaöljypohjaisen dieselin happamoitusvaikutus on noin 30 % pienempi kuin bioetanolilla ja noin 40 % pienempi kuin RME biodieselillä. Alailmakehän otsonin muodostumisvaikutus on maaöljydieselillä likimain sama kuin bioetanolilla hieman pienempi kuin RME biodieselillä. Maaöljydieselin vesistöjen rehevöitymisvaikutus on marginaalinen verrattuna biopolttoaineiden rehevöitymisvaikutukseen.

Bioetanol

Bioetanolin tuotanto ohrasta olisi siinä mielessä perusteltua, että ohran ylituotanto Suomessa riittäisi hyvin 50 000 tonnin bioetanolilaitoksen raaka-aineeksi. Esimerkiksi vuoden 2008 ohraajamä oli Suomessa 200–300 tuhatta tonnia (Maaseutuvirasto 2009). Eniten ohran tuotantoa on Länsi-Suomessa käsittäen koko Pohjanmaan sekä Hämeen TE-keskusten alueet. Perunan viljelypinta-alaa jouduttaisiin kasvattamaan riippumatta perunapohjaisen bioetanolilaitoksen sijoituspaikasta, mikä toisaalta mahdollisesti toisi maaseudulle uusia työpaikkoja. Eniten perunan tuotantoa on Pohjanmaalla ja Satakunnassa. Pohjanmaalla toimii ennestään perunatärkkelystehdas, joka käyttää runsaasti perunaa raaka-aineenaan. Hämeeseen bioetanolitehdas sopii siinä mielessä, että alueen energiansaataavuus on hyvä johtuen maakaasuputkesta, mutta tällöin perunan tuotantoa olisi alueella lisättävä huomattavasti. Sokerijuurikkaan viljelystä on maassamme tietotaitoa, mutta sokeritehtaita, joiden yhteyteen sokerijuurikas pohjaisia bioetanolilaitoksia voitaisiin sijoittaa, on nykyisin vain Säkylässä. Sokeritehtaita on suljettu Suomessa, jolloin monet viljelijät ovat joutuneet luopumaan sokerijuurikkaan viljelystä. Jos sokerijuurikasta raaka-aineena

käyttävä bioetanolitehdas perustettaisiin, entiset viljelijät voisivat aloittaa sokerijuurikkaan viljelyn uudestaan. Vanhastaan sokerijuurikasta on viljelty entisen Salon sokeritehtaan ympäristössä, josta kuljetusmatka Säkylään on sen verran lyhyt, että Säkylään sijoitettu, sokerijuurikasta ja ohraa hyödyntävä bioetanolilaitos voisi kannattavasti käyttää alueen viljelijöiden tuottamaa sokerijuurikasta, ja olisi täten raaka-aineen saatavuuden suhteen realistinen.

Bioetanolin ympäristövaikutusarvioinnin tulokset riippuvat voimakkaasti sivutuotevirtojen käytöstä ja käytön hyvityksistä. Hyödynnettäessä rankki biokaasuna pienenevät kasvihuonekaasupäästöt, happamoittavat päästöt ja alailmakehän otsonin muodostumiseen vaikuttavat päästöt verrattuna siihen, että prosessissa käytetään fossiilisia polttoaineita. Ympäristövaikutukset olisivat tässäkin tapauksessa, alailmakehän otsonin muodostumisvaikutusta lukuun ottamatta, kuitenkin suuremmat kuin fossiilisella bensiinillä tai dieselillä.

Eräs vaihtoehto olisi käyttää puupolttoaineita ja hyödyntää rankki rehuna. Tätä vaihtoehtoa on käytetty yleisesti Suomeen perustettaviksi kaavailtujen laitosten suunnitelmissa. Tällöin happamoittavat, rehevöittävät sekä alailmakehän otsoniin vaikuttavat päästöt olisivat kuitenkin edelleen suuremmat bioetanolilla kuin fossiilisella bensiinillä tai dieselillä, mutta tässäkin on taas huomioitava epävarmuustekijät bioetanolin polton päästöissä.

Jos etanolin raaka-aineena käytetyn ohran olki kerättäisiin talteen pelloilta ja poltettaisiin kattilalaitoksessa, ja sen oletettaisiin korvaavan turvetta, olisivat bioetanolin kasvihuonekaasupäästöt (käyttö huomioon otettuna) tällöin pienemmät kuin fossiilisen bensiinin tai dieselin. Olkien ja muiden kasvitähteiden energiakäyttö on kuitenkin yhtäläisesti kaikkiin kasvintuotannon suuntiin liittyvä, itsenäinen tuotantosunta, jota sopii paremmin arvioida erillisesti.

Biodiesel

NExBTL:n raaka-aineena käytettävä rypsiöljy prosessoidaan Raision tehtailla. Rypsin kotimainen tuotanto on 70 000 t, mistä suuri osa prosessoidaan elintarvikekäyttöön. Näin ollen kotimaisesta rypsiöljystä prosessoitavan NExBTL:n tuotanto ei ole ainakaan samassa mittakaavassa mahdollista kuin ohrasta tehtävän bioetanolin ilman tuntuvaa rypsin tuotannon lisäystä. Rypsin tuotantomäärää rajoittaa kuitenkin viljelylohkojen saastuminen kasvipatogeeneillä (erityisesti maalevintäinen möhöjuuri, mutta myös erilaiset homeet) usein toistuvan viljelyn seurauksena. Saastumisriskiä voidaan olennaisesti vähentää, jos samalla lohkolle viljellään rypsiä (tai rapsia) korkeintaan joka viides vuosi.

Käytettäessä taloudellista allokoitua rypsiöljyn ja rypsirouheen kuormitusosuuksien määrittämiseen ympäristökuormitukset ovat suuremmat NExBTL:llä kuin fossiilisella dieselillä. Fossiilisen primäärienergian tarve on kuitenkin NExBTL:llä pienempi kuin fossiilisella dieselillä. Massa-allokoinnin käyttäminen olisi siinä mielessä perusteltua, että rypsiöljyn ja rypsirouheen hintasuhteet vaihtelevat kausittain. Massa-allokoitua soveltaen (arviointitulokset liitteessä 3) kasvihuonekaasupäästöt ja alailmakehän otsonipitoisuuteen vaikuttavat päästöt ovat NExBTL:llä pienemmät ja happamoittavat ja rehevöittävät päästöt suuremmat kuin fossiilisella dieselillä.

RME:n ympäristövaikutusarvioon rypsiöljy-rypsirouhe allokointimenettelyn valinta vaikuttaa samaan tapaan kuin NExBTL:n tapauksessa. Massa-allokointia soveltaen (liite 3) ilmastonmuutosvaikutus ja alailmakehän otsonin muodostumisvaikutuksen arviot tulevat selvästi pienemmiksi kuin fossiilisen dieselin vastaavat arviot. Happamoitumis- ja vesistöjen rehevöitymisvaikutusten arvioihin allokointimenettelyn valinta vaikuttaa myös, mutta nämä arviot pysyvät kuitenkin suurempina kuin fossiilisella dieselillä. Jos esteröinnissä syntyvälle glyserolille lisäksi allokointiin osaa ketjun tuotantopanoksista ja päästöistä, pienenisivät RME -biodieselille arvioidut ympäristövaikutukset lisää, allokointiin sovelletuista perusteista riippuvilla määrillä. Suurista allokointiosuuksista ei tässä kuitenkaan nykyisellään voisi olla kysymys, koska sivutuoteglyserolilla ei ole vetäviä markkinoita.

6.2. Kiinteät biopolttoaineet

Kiinteiden biopolttoaineiden, eli ruokohelpin, oljen ja korren, käyttöä olisi mahdollista lisätä tämänhetkisen teknisen voimalaitoskapasiteetin puitteissa, mutta ei kuitenkaan riittävästi, jotta kaikki potentiaaliset olki- ja korsivarat saataisiin energiahyötykäyttöön. Laitosten sijaintipaikat voivat myös asettaa rajoituksia ruokohelpin ja oljen käytölle, koska tutkimusten mukaan ruokohelpeä ei kannata kuljettaa yli 120 km matkaa (esim. Lindh ym., 2008) ja oljella taloudellisesti kannattava kuljetusmatka on vielä paljon lyhyempi. Kiinteiden biopolttoaineiden polttoon soveltuvaa voimalaitoskapasiteettia tulisi siis lisätä. Yksi ratkaisu voisi olla myös maatilakokoluokan kattiloiden käyttöönoton lisääminen.

Ympäristövaikutusten arvioinnin perusteella voidaan todeta, että sivutuotteina syntyvät peltobiopolttoaineet, viljan olki ja rypsin korsi ovat ympäristövaikutuksiltaan varsin kilpailukykyisiä verrattuna turpeeseen tai fossiilisiin polttoaineisiin. Primääriset peltobiopolttoaineet, bioetanoli, biodiesel ja ruokohelpi taas eivät ole ympäristövaikutuksiltaan selkeästi fossiilisia polttoaineita tai turvetta parempia.

Kiinteillä peltobiopolttoaineilla tuotetun energian ympäristövaikutusten suhde turpeella ja metsätähdehakeella tuotetun energian ympäristövaikutuksiin vaihtelee ympäristövaikutusluokittain ja polttoaineittain. Ilmastonmuutosvaikutuksessa sekä ruokohelpi että viljan olki ja rypsin korsi olisivat turvetta parempia vaihtoehtoja. Metsätähdehakeeseen nähden olki ja korsi olisivat likimain samanveroisia, mutta ruokohelpi olisi selvästi suurempi kuormittaja. Vesistöjen rehevöitymisvaikutuksissa ruokohelpi olisi omassa luokassaan, moninkertaisesti muita suuremmin vaikutuksin. Rehevöitymisvaikutuksessa on kuitenkin ravinnehuuhtoumien osalta otettu huomioon vain viljelyyn käytettävien lannoitteiden aiheuttamat huuhtoumat. Maankäytön muutosten mahdollisesti aiheuttamia ravinnepäästöjä ei ole tarkasteltu, koska siihen ei ole kattavasti malleja olemassa. Esimerkiksi maankäytön muutosten huomioimiseen peltolohkojen ravinnepäästöissä ei ole saatavilla malleja.

Happamoitumisvaikutuksessa sekä turve että metsätähdehake olisivat vähemmän kuormittavia kuin ruokohelpi tai olki ja korsi. Alailmakehän otsonin muodostumisvaikutuksessa peltobiopolttoaineet olisivat jonkin verran turvetta ja metsätähdehaketta parempia vaihtoehtoja. Uusiutumattoman primäärienergian kulutus olisi peltobiopolttoaineilla suurempi kuin turpeella tai metsähakeella, ja ruokohelpillä selvästi suurempi kuin muilla polttoaineilla.

Olki ja korsi ovat happamoitumisvaikutusta lukuun ottamatta vähän ympäristöä kuormittavia polttoainevaihtoehtoja. Ruokohelpin ympäristöedullisuuden kokonaisarvio suhteessa muihin polttoaineisiin riippuu siitä, miten eri ympäristövaikutusten haitallisuutta painotetaan. Jos esimerkiksi annettaisiin suurin paino ilmastonmuutosvaikutukselle, olisi ruokohelpi parempi vaihtoehto turpeeseen nähden. Jos painotettaisiin enemmän vesistöjen rehevöitymisen haitallisuutta, kääntyisi asetelma toisin päin. Ympäristövaikutusten painotukseen ei ole olemassa yleisesti hyväksytyjä tieteellisiä menetelmiä, eikä siihen tästä johtuen tässä tutkimuksessa puututa. Tässä tutkimuksessa ei myöskään ollut tarkoitus antaa suosituksia saatujen tulosten perusteella, joten tutkimustulosten hyödyntämiseen poliittisessa päätöksenteossa ei tässä oteta kantaa.

7. KETJUJEN PARANNUSMAHDOLLISUUKSIEN ARVIOINTI

Erityisesti primääristen peltobiopolttoaineiden ketjuista olisi etsittävä kohteita, joissa ympäristövaikutuksia voitaisiin pienentää, jotta liikenteen ja energiantuotannon ympäristövaikutukset todella vähentyisivät peltobiopolttoaineiden käyttöä lisättäessä. Primääristen peltobioenergiaketjujen ympäristökuormituksista suurin osa syntyy kasvintuotannosta. Esimerkiksi bioetanoliketjun ilmastonmuutosvaikutuksesta noin 50 % aiheutuu suoraan kasvintuotannosta ja noin 25 % kasvintuotannon panosten tuotannosta. Vesistöjen rehevöitymisvaikutuksesta yli 90 % tulee kasvintuotannosta ja loppu kasvintuotannon panosten tuotannosta. Hyödyllisintä olisikin keskittää ympäristövaikutusten pienentämistoimenpiteet juuri kasvintuotantoon.

Kasvintuotannon ympäristökuormitukset ovat pienentyneet viime vuosikymmenten aikana. Typpilannoitteiden käyttö peltolohkoilla on vähentynyt sekä toimintatapojen että lannoiteaineiden kehittymisen tuloksena, viljelytekniikat ja teknologiat ovat vähentäneet eroosiota ja ravinteiden huuhtoumia sekä työkoneiden päästöjä, ja kalkituksessa ovat lisääntyneet hiilidioksidipäästöjä aiheuttamattomat teollisuuden sivutuotteet. Satoisampia kasvilajikkeita on kehitetty ja satotasot ovat yleisesti nousseet, mutta poikkeuksiakin löytyy, kuten rypsi, jonka satotasot ovat laskeneet sitten 1990 -luvun alun.

Kasvintuotannon parantaminen voisi menestyksekkäästi jatkua samoilla linjoilla kuin tähänkin asti. Satotasoja olisi pyrittävä nostamaan lajikekehityksellä ja uusilla viljely- ja korjuumenetelmillä, ja viljelypanosten käyttöä edelleen tarkentamalla. Satotasojen kasvatusta vähentäisi tehokkaasti kaikkia ominaiskuormituksia (kuormitus suhteessa polttoaineen energiaan), ja jos se toteutettaisiin viljelyn panoksia liikaa lisäämättä, voisivat peltobiopolttoaineiden ominaiskuormitukset laskea tuntuvasti. Ilmastonmuutosvaikutuksen kannalta keskeistä olisi typpilannoituksen optimointi (ravinteiden ominaiskäytön minimointi), jolla vähentyisivät sekä suorat että ammoniakkin ja huuhtoumien kautta syntyvät epäsuorat dityppioksidin päästöt. Myös karbonaattivapaiden neutralointiainesten käytön lisääminen pienentäisi ilmastonmuutosvaikutusta. Ravinnehuuhtoumien vähentäminen tapahtuisi myös satotasojen nostolla ja ravinnetaseiden optimoinnilla sekä eroosiota vähentävillä viljelytekniikoilla ja huuhtoumia vähentävillä suojavajöhykkeillä.

Kasvintuotannon rinnalla olisi huolehdittava myös biopolttoaineketjujen muiden osien kehittämisestä. Lannoiteteollisuuden dityppioksidipäästöjä ja primäärienergian

kulutusta voitaisiin vähentää uusilla teknologioilla ja prosessien muutoksilla mm. ammoniakkin ja typpihapon tuotannossa. Suomalaisessa lannoiteteollisuudessa on jo tehty useita ympäristökuormituksia vähentäviä prosessi- ja tuotantotapamuutoksia, ja suunnitelmia uusien ympäristöystävällisempien prosessien hankkimiseksi on tietävästi vireillä.

Nestemäisten biopolttoaineiden tuotantoprosessien saantoja olisi mahdollista jonkin verran kasvattaa ja primäärienergian kulutusta vähentää. Esimerkiksi fermentointia ja tislausprosesseja optimoimalla voitaisiin lisätä etanolin saantoa raaka-aineista. RME biodieselin laatua ja saantoa voitaisiin lisätä uusilla öljynerotusteknologioilla ja esteröinti-prosessin hallintaa automatisoimalla.

Huomattava parannusmahdollisuus voisi myös olla, jos oljesta tai yleensä lignoselluloosaa sisältävistä peltobiomassoista pystyttäisiin tekemään etanolia. Tätä ns. toisen sukupolven vaihtoehtoa ei tutkittu tässä tutkimuksessa, koska kohteeksi oli valittu tuotantoasteelle edenneet ja käytön myötä jalostuneet biopolttoaineiden tuotanto- ja käyttöteknologiat. Vehnän oljesta tuotetulle etanolille energiantarve on Elsayedin ym. (2003) mukaan $-0,028$ MJ/MJ ja kasvihuonekaasupäästöt $0,013$ kg CO₂-ekv/MJ, missä viljelyn kuormitukset ja energiantarve on kaikki allokoitu viljan jyville. Näin ollen alkutuotannosta ei kohdentuisi kuormituksia bioetanolille. Kun suurin osa bioetanolin tuotannon ympäristökuormituksista tulee alkutuotannosta, olisi bioetanolin tuotanto oljesta selvästi ympäristöystävällisempää kuin fossiilisen bensiinin. Myös Edwards ym. (2006) ilmoittavat samaa suuruusluokkaa olevat GHG-kuormitukset vehnän oljelle kuin Elsayed ym. (2003).

Oljen ja korren käyttöä voitaisiin tehostaa kehittämällä pieniä maatilakokoluokan olkikattiloita omakotitalojen lämmitykseen soveltuviksi. Lisäksi oljen briketointi helpottaisi käsittelyä ja varastointia, jolloin oljen käyttö olisi myös tässä mielessä mahdollista omakotitaloissa. Brikettejä voitaisiin polttaa myös tavallisissa hakekattiloissa, joten niiden käyttöönotto ei edellyttäisi lämmitysjärjestelmien laajamittaista uusimista.

8. LÄHTEET

Agrimarket. 2009. Kasvuohjelmat, peruna. Saatavissa:

http://www.agrimarket.fi/Maatalous_ja_Elaimet/Kasvuohjelmat/Viljat/main.cfm?iO=121

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. 172 s. + liitt. 17 s.

Aro-Heinilä, E. 2009. MTT Taloustutkimus. Biomassojen kuljetukset. Sähköpostiviesti 4.3.2009.

Becker, M. & Nehring, K. 1967. Handbuch der Futtermittel. Dritter Band. Paul Parey. Hamburg und Berlin. 420 s.

Bernesson, S. 2004. Life Cycle Assesment of Rapeseed oil, Rape Methyl Ester and Ethanol as Fuels – A Comparison between Large- and Small-Scale Production. Swedish University of Agricultural Sciences. Miljö, teknik och lantbruk Rapport 2004:01.

Bernesson, S., Nilsson, D. & Hansson, P.E. 2006. A limited LCA comparing large-scale and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. Biomass and Bioenergy 30 (2006) 46-57.

Bertrupp, F. 2009. Kirjallinen tiedonanto.

Bhattacharya, S.C., Albina, D.O. & Khaing, A.M. 2002. Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. Biomass and Bioenergy 23 (2002) 387-395.

Bio Help Oy. 2009. Monitoimikattilat. Saatavissa:

<http://www.netikka.net/honkaniemi/monitoimi.htm>

Dahl, M. 2006. Esimerkkejä seosrehuruokinnassa käytettävistä ostorehukomponenteista. Seosrehu-uutiset 2006: 22-23. Saatavissa: www.seosrehu-uutiset.fi

Edwards, R., Larivé, J.-F, Mahieu, V. & Rouveïrolles, P. 2006. Well-to-Wheels Analysis of Future automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Jointly carried out by EUCAR, CONCAWE and JRC/IEA. Well-to-Tank Report Version 2b, May 2006.

Elsayed, M. A., Matthews, R. & Mortimer, N. D. 2003. Carbon and energy balances for a range of biofuels options. Department of Trade and Industry, UK.

Enwald, H. 2009. Valcon Oy Suulliset kommentit 9.3.2009 ja 29.4.2009.

Enwald, H. 2007. Viljapohjaisen bioetanoliuotannon mahdollisuudet Suomessa. Biojalostamo hämeeseen seminaari 12.6.2007. Saatavissa:

http://portal.hamk.fi/portal/page/portal/HAMKJulkisetDokumentit/Tutkimus_ ja_ kehitys/Bioketju/HarriEnwald.pdf

EPA, Environmental Protection Agency. 2002. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. Draft Technical Report. US Environmental Protection Agency.

Farmit.net. 2009. Kasvuohjelma. Saatavissa:

http://www.farmit.net/farmit/fi/03_kasvinviljely/02_kasvuohjelma/index.jsp

Flyktman, M. & Paappanen, T. 2005. Ruokohelven käyttökapasiteettiselvitys. VTT Tutkimusselostus Pro2105/06. VTT Prosessit, Jyväskylä. 28 s. + liitt. 3 s.

Grisso, R. D. Perumpral, J. V., Zoz, F. M 2007. preadsheep for matching tractors and drawn implements. Applied Engineering in Agriculture, Vol. 23(3): 259-265, American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0883-8542.

Hansen, A. C., Zhang, Q. & Lyne, P. W. L. 2005. Ethanol-diesel fuel blends—a review. Bioresource Technology 96: 277-285.

Hauschild, M., Bastrup-Birk, A., Hertel, O., Schöpp, W. & Potting, J. 2004. Photochemical ozone formation. Teoksessa: Potting, J. & Hauschild, M. (toim.). 2004. Background for spatial differentiation in life cycle assessment – the EDIP 2003 methodology. Institute of Product Development, Copenhagen. Environmental news 80.

Hietanen, L. 2009. Lassila & Tikanoja Oy. Suullinen tiedonanto 24.4.2009

HUV 2009. Näringsrekommendationer och fodermedelstabeller till svin. Internet-julkaisu. Saatavissa:

<http://www-huv.slu.se/cgi-bin-huv/foderlista/svin/db.pl?typ=alla&subtyp=ut>

Hyvönen, N.P., Huttunen, J.T., Shurpali, N.J., Tavi, N.M., Repo, M.E. & Martikainen, P.J. 2009. Fluxes of nitrous oxide and methane on an abandoned peat extraction site: Effect of reed canary grass cultivation. Bioresour. Technol., doi:10.1016/j.biortech.2009.04.043

IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 11: N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application, Table 11.1 Default emission factors to estimate direct N₂O emissions from managed soils.

<http://www.agroetanol.se/> Lantmännen Agroetanol AB:n nettisivut. Viitattu 4.4.2009.

Jaakko Pöyry Oy 2006. Suomen bioetanol Oy. Punkaharjun bioetanolitohdas. Ympäristövaikutusten arviointiohjelma.

Kardonar. 2009. Faust Maatilakattilat (olkikattilat). Saatavissa: <http://www.kardonar.com/faustolki.html>

Karman, D. 2003. Ethanol fuelled motor vehicle emissions: A literature review. Requested by the Air Health Effects Division of Health Canada.

Kasvun Ympäristö 2007. Lahden tiede- ja yrityspuisto Oy:n tiedotuslehti 1/2007. Saatavissa: http://www.lahtisbp.fi/easydata/customers/lahti/files/Julkaisut/Kasvun_ymparisto_1-2007.pdf

Kløve, B. 2001. Characteristics of nitrogen and phosphorus loads in peat mining wastewater. Wat. Res. Vol. 35, No. 10, pp. 2353-2362.

Kousoulidou, M., Fontaras, G., Mellios, G. & Ntziachristos, L. 2008. Effect of biodiesel and bioethanol on exhaust emissions. ETC/ACC Technical Paper 2008/5.

Kymäläinen, M. 2007. Bioetanoli ja biokaasutehdas Hämeeseen. Biojalostamo Hämeeseen seminaari, 12.6.2007 Hämeenlinna. Saatavissa: http://portal.hamk.fi/portal/page/portal/HAMKJulkisetDokumentit/Tutkimus_ja_kehitys/Bioketju/MarittaKymalainen.pdf

Lankoski, J. & Ollikainen, M. 2006. Bioenergy crop production and climate policies: A von Thunen model and case of reed canary grass in Finland. University of Helsinki, Department of Economics and Management. Discussion papers n:o 17. Environmental Economics, Helsinki.

Lapuerta, M., Armas, O. & Rodríguez-Fernández, J. 2008. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. Progress in Energy and Combustion Science 34: 198–223.

Latvala, T., Aro-Heinilä, E., Toivonen, R. & Järvinen, E. 2007. Bioenergian tuotanto ja markkinat vuonna 2007 sekä kehitysnäkymät vuoteen 2015. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja nro 205. 71 s. Saatavissa: http://www.ptt.fi/dokumentit/rap205_2506080905.pdf

Leeson, S. & Summers, J.D. 2005. Commercial Poultry Nutrition. 3rd edition. Nottingham University Press. Milton Keynes. 416 s.

Liimatainen, H. 2004. Perunapohjaisen bioetanolin valmistuksen optimointi ja laadunvalvonta. Fysikaalisen kemian kirjallisuustutkielma. Perunapohjaisen bioetanolin valmistuksen kehittäminen. Fysikaalisen kemian Pro Gradu- tutkielma.

Lindh, T., Paappanen, T., Rinne, S., Sivonen, K., & Wihersaari, M., 2008. Reed canary grass transportation costs – Reducing costs and increasing feasible transportation distances. Biomass and Bioenergy In Press, Corrected Proof. Available online 25 October 2008.

LIPASTO 2002. Yksikköpäästöjen laskentaperusteet. Tavara-autot. VTT. Päivitetty 23.9.2002.

Lötjönen, T., 2007. Harvest losses in reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) production. Teoksessa: NJF Seminar 405: Production and Utilization of Crops for Energy. 25-26. September 2007, Vilnius, Lithuania. NJF Report, Vol. 3, No. 4, s. 66-67.

Lötjönen, T. & Isolahti, M., 2006. Korjuu paaleina edullisinta – kehitystyö alentaa kustannuksia, *Bioenergia* 5 (2006), 21-23.

Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus. 2009. Matilda-tietopalvelu. Saatavissa:

http://www.matilda.fi/servlet/page?_pageid=115,193&_dad=portal30&_schema=PORTAL30

Maaseutuvirasto, 2009. Viljan myyminen interventiovarastoon. Tiedote. Saatavissa: <http://www.mavi.fi/fi/index/markkinatuet/interventiovarastointijaohjelmat/Viljaninterventio.html>

McCormick, R. L., Williams, A., Ireland, J., Brimhall, M. & Hayes, R.R. 2006. Effects of Biodiesel Blends on Vehicle Emissions. National Renewable Energy Laboratory, US.

McDonald, P., Edwards, R.A. & Greenhalgh, J.F.D. 1988. *Animal Nutrition*. 4th edition. Longman. Hong Kong. 543 s.

Monni, S., Syri, S. & Savolainen, I. 2004. Uncertainties in the Finnish greenhouse gas emission inventory. *Environmental Science & Policy* 7 (2004) 87-98.

Muraleedharan, T., R., Radojevic, M., Waugh, A. & Caruana, A. 2000. Emissions from the combustion of peat: an experimental study. *Atmospheric Environment* 34 (2000) 3033-3035.

Murphy, J. D. & McCarthy, K. 2005. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. *Applied Energy*, 82, 148-166.

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT tiedotteita 2357. 134 s. + liitt. 19 s.

Mälkki, H. & Frilander, P. 1997. Life cycle assessment of peat utilisation in Finland. VTT Publications 333. Espoo. 86 s. + liitt. 6 s.

Mälkki, H. & Virtanen, Y. 2001. Hakkuu- ja sahatähteiden energiakäytön elinkaariarviointi, loppuraportti. VTT Kemianteekniikka, Espoo. 46 s.

Nikander, S. 2008. Greenhouse gas and energy intensity of product chain: case transport biofuel. Master's thesis. Helsinki University of Technology. Helsinki, Finland, May 9, 2008. 88 s.

Nikolaisen, L. 2008. Straw for Energy Production in Denmark. Danish Technological Institute.

Nissinen, A., Grönroos, J., Heiskanen, E., Honkanen, A., Katajajuuri, J.-M., Kettunen, J., Kurppa, S., Mäkinen, T., Seppälä, J., Silvenius, F., Timonen, P., Virtanen, Y., Voutilainen, P. 2005. Development of benchmarking for the environmental impacts of different products, services and consumption patterns. In: Sustainable Consumption: The Contribution of Research, Workshop 10-12 February 2005, Gabels Hus, Oslo, p. 98-114. Norwegian University for Science and Technology (NTNU), Industrial Ecology program, Report 1/2005, Trondheim, Norway. ISBN 82-7948-046-3.

Nilsson, D. 2006. Etanol för sockerbeter. Förstudie om möjligheterna tillstorskalig produktion i Blekinge. Länsstyrelsen Blekinge län, 371 86 Karlskrona. Rapport 2006:7.

Paappanen, T., Lindh, T., Kärki, J., Impola, R., Rinne, S., Lötjönen, T., Kirkkari, A-M., Taipale, R. & Leino, T. 2008. Ruokohelven polttoaineketjun kehittäminen liiketoimintamahdollisuuksien parantamiseksi. VTT tiedotteita 2452. Helsinki. 158 s. + liitt. 9 s.

Pahkala, K., Hakala, K., Kontturi, M. & Niemeläinen, O. 2009. Peltobiomassat globaalina energianlähteenä. Maa- ja elintarviketalous 137. 48 s.

Pahkala, K. & Kontturi, M. 2008. Korsibiomassojen laatu bioetanolin raaka-aineena. Maataloustieteen Päivät 2008. Saatavissa: www.smts.fi

Pahkala, K., Isoahti, M., Partala, A., Suokannas, A., Kirkkari, A-M., Peltonen, M., Sahramaa, M., Lindh, T., Paappanen, T., Kallio, E. & Flyktman, E. 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. MTT:n verkkojulkaisu. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met1b.pdf>

Partanen, K. 2000. Tiivistetty tärkkelysrankki lihasikojen rehuna. Sika 30, 4: 20-21.

Paulrud, S. & Nilsson, C., 2001. Briquetting and Combustion of Spring-Harveste Reed-canary Grass: Effect of Fuel Composition. Biomass and Bioenergy 20 (2001) 25-35.

Pimentel, D. 2003. Ethanol Fuels. Energy Balancee, Economics, and Environmental Impacts are Negative. Natural Resources Research, Vol.12, No.2, June 2003. Saatavissa: <http://www.ethanol-gec.org/netenergy/neypimentel.pdf>

Pääkkönen, J., Vuorikoski, S., Pirkanniemi L. & Hyytiä, H. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Suomen perunatärkkelysteollisuudessa. Suomen ympäristö 729. Suomen ympäristökeskus. Helsinki 2004.

Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Teknillisten tieteitten akatemia. Jyväskylä.

Reijnders, L. & Huijbregts, M. A. J. 2006. Life cycle greenhouse gas emissions, fossil fuel demand and solar energy conversion efficiency in European bioethanol production for automotive purposes. Journal of Cleaner Production 15 (2007) 1806-1812.

Ren 21. 2009. Renewabel Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2005 Global Status Report. 2008 Update, Table N9. Saatavissa: http://www.ren21.net/pdf/RE_GSR_2009_Update.pdf

Salo, R. (toim.) 2000. Biomassan tuottaminen kuidun ja energian raaka-aineeksi. Tutkimuksen loppuraportti, osa II. Ruokohelven ja oljen korjuu, tuotantokustannukset ja polttotekniikka. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 85.

Salo-Asikainen, S. 2007. Normeilla tehokkaampaan pienten energiantuotantolaitosten säätelyyn. Ilmansuojelu 4/2007. Ilmansuojelu ry:n jäsenlehti. Saatavissa: http://www.isy.fi/islehdet/ISU4_2007_5.pdf

Schmitz, N (ed.). 2003. Bioethanol in Deutschland. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 21. Meó Consulting Team, Köln. Landwirtschaftsverlag, GmbH, Münster, Tyskland.

Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M. & Hettelingh, J-P. 2006. Country-dependent characterisation factors for acidification and terrestrial eutrophication based on accumulated exceedance as an impact category indicator. International journal of life cycle assessment 11(6): 403-416.

Seppälä, J., Knuutila, S. & Silvo, K. 2004. Eutrophication of aquatic ecosystems. A new method for calculating th potential contributions of nitrogen and phosphorus. International journal of life cycle assessment 9(2): 90-100.

Shurpali, N. J., Hyvönen, N. P., Huttunen, J. T., Clement, R. J., Reichstein, M., Nykänen, H., Biasi, C. & Martikainen, P. J. 2009. Cultivation of perennial grass for bioenergy on a boreal organic soil – carbon sink or source? GCB Bioenergy (2009), 35-50.

Siljander-Rasi, H. & Valaja, J. 2007. Kuivaamaton perunaproteiini lihasikojen rehuna. 28 s. Loppuraportti 3.12.2007. Saatavissa: <https://portal.mtt.fi/pls/mttdocspub/docs/F1271984965/FINAL-PERUNAPROTEIINIKOE%20LOPPURAPORTTI%2003-12-07.DOC>

Siljander-Rasi, H., Perttilä, S. & Partanen, K. 2006. Sikojen rehut. In: Toim. Hilikka Siljander-Rasi, Ari Nopanen ja Jukka Helin. Sian ruokinta ja hoito. Tieto tuottamaan 114: 27-36.

SJV. 2004a. Marknadsöversikt. Etanol, en jordbruks- och industriprodukt. Rapport 2004:21. Jordbruksverket, Jönköping.

Smokers, R. & Smit, R. 2004. Compatibility of pure and blended biofuels with respect to engine performance, durability and emissions. A literature review. GAVE programme. SenterNovem, the Netherlands.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A. & Wratt, D. 2007. Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. Pages 19-91

Sten, V. 2007. Bioetanolitehtaasta syntyvät rehujaheet ja niiden markkinat. Selvitys liittyen Bioetanoli- ja biokaasutehdas Hämeen –hankkeeseen. HAMKin e-julkaisuja 8/2007. 67 s. Saatavissa: www.hamk.fi/julkaisut

Suomi, K. 1980. Tuore rankki lihasikojen rehuna. Koetoiminta ja käytäntö 1.7.1980.

The Centre of Biomass Technology. 1998. Straw for Energy Production. Technology - Environment - Economy. Second Edition. 53 s.

Tilastokeskus. 2004. Energiatilastot. Tilastokeskus, Helsinki.

VAPO Oy. 2008. Verkkosivusto <http://www.vapo.fi>. Viitattu 24.2.2008.

Valtra. 2007. Valtra sallii 100-prosenttisen biodieselin käytön myös Common rail –moottoreissa. Lehdistötiedote 11.11.2007. Saatavissa: <http://www.valtra.fi/news/press/2007/382.asp>

Vesanto, T., Aarniala, M., Asplund, D., Kuusisto, R., Rautanen, J., Heusala, T., Mattila, I., Broadstreet, N., Hilska-Aaltonen, M., Sandell, M., Seppä, L., Alm, M., Vedenoja, J., Nikkola, E. & Reskola, V-P. 2007 Peltobiomassa, liikenteen biopolttonesteet ja biokaasu-jaosto. Loppuraportti, Helsinki 2007. Työryhmämuistio mmm 2007:2. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/mmm/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2007/51YTgDdW9/trm2007_2.pdf

Vihma, A., Aro-Heinilä, E. & Sinkkonen, M. 2006. Rypsi-biodieselin (RME) maatilatuotannon kannattavuus. MTT:n selvityksiä 115. 38 s.

Virtanen, Y., Usva, K. & Katajajuuri, J-M. Mallasohra –toimintaverkon kestävyysparantamisen työkalut (MOKE). Suomalaisen keskioluen ympäristövaikutusten elinkaariarviointi. Tiivistelmä. 8 s.

von Weymarn, Niklas (toim.). 2007. Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista. Espoo, VTT. 44 s. VTT Tiedotteita Research Notes; 2412. ISBN 9789513869687. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2412.pdf>

Welin, T. 2008. Nordkalk oy. Kirjallinen tiedonanto 9.9. 2008

Wereko-Brobby, C. & Hagan, E. B. 1996. Biomass Conversion and Technology: John Wiley & Sons, Chichester, 203 p.

Wilkie, A. C., Riedesel, K. J. & Owens, J. M. 2000. Stillage characterisation and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 19, 63-102.

Xavier, M. R. 2007. Issue analysis. The Brazilian Sugarcane Ethanol Experience. Competitive Enterprise Institute. CEI. Advancing Liberty From Economy to Ecology. 2007 No. 3.

LIITE 1. Karakterisointikertoimet

Taulukko 32. Tutkimuksessa käytetyt karakterisointikertoimet.

	Karakterisointikerroin	Lähde
Ilmastonmuutos - CO ₂ - CH ₄ - N ₂ O	kg CO ₂ -ekv./kg - 1 - 25 - 298	Solomon ym., 2007
Rehevöityminen - NH ₃ ilmaan - NO _x ilmaan - N-tot (liukoinen) - P-tot (liukoinen)	kg PO ₄ ³⁻ -ekv./kg - 0,04 - 0,015 - 0,42 - 3,06	Seppälä ym., 2004
Happamoituminen - SO ₂ - NH ₃ - NO _x	kg AE-ekv./kg - 0,463 - 0,535 - 0,186	Seppälä, 2006
Alailmakehän otsoni - CH ₄ - NMVOC - NO _x	1000 m ² * ppm * h/kg - 0,33 - 0,27 - 0,35	Hauschild ym., 2004

LIITE 2. Bioetanoliketjun päästöt

Taulukko 33. Elinkaari-inventaarion lopputulokset bioetanolin valmistuksesta, kun kaikki kuormitukset on allokoitu päätuotteelle..

Ympäristökuormitus	Vehnä	Peruna	Sokerijuurikas 40 %	Sokerijuurikas 60 %	Ohra
CO ₂ , kg/MJ	0,057	0,048	0,065	0,064	0,060
CH ₄ , g/MJ	0,220	0,201	0,100	0,083	0,217
N ₂ O, mg/MJ	167	107	140	148	155
NH ₃ , mg/MJ	84	71	98	91	113
NO _x , mg/MJ	160	160	175	186	183
SO ₂ , mg/MJ	29	27	123	121	30
PM, mg/MJ	11	10	18	18	13
NM VOC, mg/MJ	21	20	20	21	24
CO, g/MJ	0,043	0,041	0,040	0,038	0,049
N, mg/MJ	475	307	404	409	452
P, mg/MJ	28	32	27	29	29
Primäärienergia, MJ	0,81	0,75	0,76	0,74	0,87

Taulukko 34. Bioetanolin valmistuksen ympäristövaikutusarvio, kun kaikki kuormitukset on allokoitu päätuotteelle.

Ympäristövaikutus	Vehnä	Peruna	Sokerijuurikas 40 %	Sokerijuurikas 60 %	Ohra
Ilmastonmuutos, kg CO ₂ - ekv./MJ	0,112	0,085	0,109	0,110	0,112
Happamoituminen mg AE- ekv./MJ	84	77	144	141	103
Troposfäärin otsonin muodostuminen, person ppm h/ MJ	1,34 x 10 ⁻⁴	1,27 x 10 ⁻⁴	1,00 x 10 ⁻⁴	9,8 x 10 ⁻⁵	1,46 x 10 ⁻⁴
Rehevöityminen vesistöissä, mg PO ₄ -ekv./MJ	196	172	178	184	197

Taulukko 35. Elinkaari-inventaarion lopputulokset tuotantovaiheittain käytettäessä ohraa raaka-aineena bioetanolin valmistuksessa, kun kaikki kuormitukset on allokoitu päätuotteelle.

Ympäristökuormitus	Panostuotanto	Viljely	Kemikaalit	Kuljetukset	Etanolin tuotanto- prosessi
CO, g/MJ	0,007	0,036	0,0002	0,0001	0,007
CO ₂ , kg/MJ	0,015	0,026	0,0004	0,0006	0,018
N ₂ O, mg/MJ	71	89	0	0	0,5
CH ₄ , g/MJ	0,013	0,0003	0,0002	0	0,18
NH ₃ , mg/MJ	10	104	0	0	0
NM VOC, mg/MJ	4	18	1,4	0,2	0,6
NO _x , mg/MJ	37	100	1,5	13	39
PM, mg/MJ	2	11	0,1	0,2	2
SO ₂ , mg/MJ	10	12	1	0,2	5
N, mg/MJ	28	424	0	0	0
P, mg/MJ	2	27	0	0	0
Primäärienergia, MJ/MJ	0,25	0,23	0	0,02	0,34

LIITE 3. Biodieselketjun päästöt

Taulukko 36. RME-biodieselin elinkaariset ympäristökuormitukset laskettuna sekä taloudellista että massaperusteista allokointia käyttäen sekä allokoimalla kaikki biodieselille.

Ympäristökuormitus	RME, taloudellinen allokointi	RME, massa-allokointi	RME, kaikki biodieselille
CO, g/MJ	0,0746	0,033	0,105
CO ₂ , kg/MJ	0,0451	0,0212	0,0632
CH ₄ , g/MJ	0,0509	0,0234	0,0708
N ₂ O, mg/MJ	136	92,5	298
NH ₃ , mg/MJ	94,2	41,1	133
NO _x , mg/MJ	227	102	317
SO ₂ , mg/MJ	36,9	16,6	51,5
PM, mg/MJ	21,1	9,25	29,6
NM VOC, mg/MJ	31,8	13,9	44,8
N, mg/MJ	381	166	537
P, mg/MJ	34,4	15	48,5
Primäärienergia, MJ	0,674	0,342	0,929

Taulukko 37. RME-biodieselin elinkaariset ympäristökuormitukset laskettuna tuotantovaiheittain taloudellista allokointia käyttäen.

Ympäristökuormitus	Panostuotanto	Viljely ja esikäsittely	Öljyn puristus	Esteröinti
CO, g/MJ	0,00547	0,0678	0,000485	0,000819
CO ₂ , g/MJ	17,916	21,6	0,778	2,4
CH ₄ , g/MJ	0,0442	0,00154	0,00309	0,00203
N ₂ O, mg/MJ	81,9	130	0,074	0,074
NH ₃ , mg/MJ	2,62	91,5	0	0,000346
NO _x , mg/MJ	33,5	186	1,47	5,87
SO ₂ , mg/MJ	15,6	19	1,24	0,968
PM, mg/MJ	0,921	19,9	0,155	0,0983
NM VOC, mg/MJ	0,0504	31,7	0,0348	0,0282
N, mg/MJ	0	381	0	0
P, mg/MJ	0	34,4	0	0
Primäärienergia, MJ	0,29	0,287	0,0195	0,0774

Taulukko 38. RME-biodieselin valmistuksen ympäristövaikutusarviot.

Ympäristövaikutus	RME, taloudellinen allokointi	RME, massa-allokointi	RME, kaikki biodieselille
Ilmastonmuutos, kg CO ₂ -ekv./MJ	0,110	0,049	0,154
Happamoituminen mg AE-ekv./MJ	109,6	48,6	153,9
Troposfäärin otsonin muodostuminen, person ppm h/MJ	10,48 x 10 ⁻⁵	4,72 x 10 ⁻⁵	14,6 x 10 ⁻⁵
Rehevöityminen vesistössä, mg PO ₄ -ekv./MJ	272	119	384

Taulukko 39. NExBTL -biodieselin elinkaariset ympäristökuormitukset laskettuna sekä taloudellista että massaperusteista allokointia käyttäen ja vertaus fossiilisen dieselin koko ketjun ympäristökuormitukseen käyttö mukaan lukien.

Ympäristökuormitus	NExBTL, taloudellinen allokointi	NExBTL, massa-allokointi	Diesel, fossiilinen
CO, g/MJ	0,038	0,022	0,217
CO ₂ , kg/MJ	0,051	0,035	0,073
CH ₄ , g/MJ	0,147	0,119	0,004
N ₂ O, mg/MJ	154	86	21
NH ₃ , mg/MJ	70	39	4
NO _x , mg/MJ	170	111	250
SO ₂ , mg/MJ	37	25	5
PM, mg/MJ	11	7	18
NM VOC, mg/MJ	17	10	83
N, mg/MJ	570	305	
P, mg/MJ	32	14	
Primäärienergia, MJ	0,69	0,52	1,08

Taulukko 40. NExBTL -biodieselin elinkaariset ympäristövaikutukset laskettuna sekä taloudellista että massaperusteista allokointia käyttäen ja vertaus fossiilisen dieselin koko ketjun ympäristövaikutuksiin käyttö mukaan lukien.

Ympäristövaikutus	NExBTL, taloudellinen allokointi	NExBTL, massa-allokointi	Diesel
Ilmastonmuutos, kg CO ₂ -ekv./MJ	0,101	0,062	0,079
Happamoituminen mg AE-ekv./MJ	84	52	49
Troposfäärin otsonin muodostuminen, person ppm h/MJ	1,12x10 ⁻⁴	9,6 x10 ⁻⁵	1,11x10 ⁻⁴
Rehevöityminen vesistöissä, mg PO ₄ -ekv./MJ	202	113	4

Taulukko 41. NExBTL -biodieselin ympäristökuormitukset laskettuna tuotantovaiheittain taloudellista allokointia käyttäen.

Ympäristökuormitus	Panostuotanto	Viljely	Rypsiöljyn prosessointi	Kemikaalit	Kuljetukset	NExBTL-prosessi
CO, g/MJ	0,004	0,031	0,001	0,0015	0,0002	0,0005
CO ₂ , kg/MJ	0,014	0,014	0,016	0,004	0,0009	0,0013
N ₂ O, mg/MJ	60	93	0,4	0,1	0,03	0,04
CH ₄ , g/MJ	0,032	0,0006	0,061	0,043	0	0,01
NH ₃ , mg/MJ	2,3	68	0	0	0	0
NM VOC, mg/MJ	1,1	15	0,2	0,1	0,07	0,1
NO _x , mg/MJ	23	83	44	10	6,6	2,6
PM, mg/MJ	0,05	9	2	0	0,07	0,06
SO ₂ , mg/MJ	11	9	16	0,7	0	0,5
N, mg/MJ	3	543		0	0	0
P, mg/MJ	0,02	2,6		0	0	0
Primäärienergia, MJ/MJ	0,23	0,11	0,20	0,09	0,01	0,03

LIITE 4. Ruokohelpiketjun päästöt

Taulukko 42. Ruokohelpin viljelyn aiheuttamat päästöt peltomailla (g/MJ). Työkoneiden polttoaineen kulutuksessa on huomioitu kylvömuokkaus ja kylvö (1.vuosi), lannoitteiden ja kalkin levitys sekä torjunta-aineiden ruiskutus.

Ympäristökuormitus	Työkoneiden polttoaineen kulutus	Lannoitteiden valmistus	Kalkin valmistus ja käyttö	Huuhtoumat	Yhteensä
CO ₂	0,951	2,669	42,126	-	45,746
CO	0,0051	-	-	-	0,0051
N ₂ O	0,0004	0,0127	-	-	0,0131
CH ₄	0,00005	0,0069	-	-	0,00693
NO _x	0,0138	0,0048	0,0022	-	0,0208
SO ₂	0,0012	0,0024	0,0005	-	0,0041
NH ₃	-	0,0004	-	-	0,0004
NMVOC	0,0023	0,0006	-	-	0,0029
PM	0,0015	-	0,0047	-	0,0062
P-tot	-	-	-	0,011	0,011
N-tot	-	-	-	0,046	0,046

Taulukko 43. Ruokohelpin viljelyn aiheuttamat päästöt turvemaiilla (g/MJ). Työkoneiden polttoaineen kulutuksessa on huomioitu kylvömuokkaus ja kylvö (1.vuosi), lannoitteiden ja kalkin levitys sekä torjunta-aineiden ruiskutus.

Ympäristökuormitus	Työkoneiden polttoaineen kulutus	Lannoitteiden valmistus	Kalkin valmistus ja käyttö	Huuhtoumat	Yhteensä
CO ₂	0,946	3,176	67,718	-	71,84
CO	0,0051	-	-	-	0,0051
N ₂ O	0,0004	0,0138	-	-	0,0142
CH ₄	0,00005	0,0080	-	-	0,0081
NO _x	0,0138	0,0060	0,0035	-	0,0233
SO ₂	0,0012	0,0038	0,0009	-	0,0059
NH ₃	-	0,0005	-	-	0,0005
NMVOC	0,0023	0,0007	-	-	0,003
PM	0,0015	-	0,0075	-	0,009
P-tot	-	-	-	0,010	0,010
N-tot	-	-	-	0,469	0,469

Taulukko 44. Ruokohelpin korjuun aiheuttamat päästöt (g/MJ) peltomaille ja turvemaille toisena vuotena ja sitä seuraavina vuosina. Korjuussa on mukana niitto, karhotus, paalaus ja paalien lastaus.

		CO ₂	CO	NO _x	N ₂ O	CH ₄	NMVOC	PM	SO ₂
Peltomaa	Toinen vuosi	1,612	0,0087	0,0235	0,0007	0,00008	0,0039	0,0025	0,0020
	Seuraavat vuodet	1,364	0,0074	0,0199	0,0006	0,00007	0,0033	0,0022	0,0017
Turvemaa	Toinen vuosi	1,543	0,0083	0,0225	0,0007	0,00008	0,0038	0,0024	0,0019
	Seuraavat vuodet	1,522	0,0082	0,0222	0,0007	0,00008	0,0037	0,0024	0,0019

Taulukko 45. Ruokohelpin kuljetusten päästöt (g/MJ) kuljetusmatkan ollessa 70 kilometriä.

Paalityyppi	CO ₂	CO	NO _x	N ₂ O	CH ₄	SO ₂	PM
Suurkanttipaali, 0,7 m	0,59	0,0002	0,007	0,00002	0,00001	0,00001	0,00008
Suurkanttipaali, 0,9 m	0,60	0,0002	0,007	0,00002	0,00001	0,00001	0,00008
Orkel-paalaimen paali	0,46	0,0002	0,005	0,00001	0,00001	0,00000	0,00006

Taulukko 46. Ruokohelpin kuljetusten päästöt (g/MJ) kuljetusmatkan ollessa 120 kilometriä.

Paalityyppi	CO ₂	CO	NO _x	N ₂ O	CH ₄	SO ₂	PM
Suurkanttipaali, 0,7 m	0,76	0,0003	0,009	0,00002	0,00001	0,00001	0,00011
Suurkanttipaali, 0,9 m	0,79	0,0003	0,009	0,00002	0,00001	0,00001	0,00011
Orkel-paalaimen paali	0,60	0,0002	0,007	0,00002	0,00001	0,00001	0,00008

Taulukko 47. Ympäristövaikutusten arviot ruokohelpiketjulle pelto- ja turvemaalla.

Ympäristövaikutus	Peltomaa	Turvemaa
Ilmastonmuutos, CO ₂ -ekv., kg/MJ	0,0653	0,0957
Happamoituminen, AE-ekv., mg/MJ	105,4	106,4
Troposfäärin otsonin muodostuminen, person ppm h/ MJ	4,59 x 10 ⁻⁵	4,68 x 10 ⁻⁵
Rehevytyminen vesistöissä, PO ₄ -ekv., mg/MJ	68,5	84,0

Taulukko 48. Ruokohelpiketjun primäärienergian kulutus pelto- ja turvemaalla.

Ketjun vaihe	Primäärienergian kulutus, MJ/MJ	
	Peltomaa	Turvemaa
Työkoneiden polttoaineen kulutus	0,0012	0,0012
Lannoitteiden valmistus	0,0451	0,0537
Kalkin valmistus	0,007	0,011
Korjuu	0,0017	0,0017
Kuljetukset	0,0081	0,0081
Yhteensä	0,0911	0,1210

LIITE 5. Viljan oljen sekä rypsin ja rapsin korren ketjun aikaisia päästöjä

Taulukko 49. Viljan oljen sekä rypsin ja rapsin korren karhotuksen, paalauksen ja paalien lastauksen päästöt (g/MJ). Paalit oletetaan lastattavan pellolta suoraan täysperävaunuyhdistelmään, jolla paalit kuljetetaan polttolaitokselle.

Ketju	CO ₂	CO	NO _x	N ₂ O	CH ₄	NMVOC	PM	SO ₂
Viljan olki	1,6777	0,0091	0,0244	0,0008	0,0001	0,0041	0,0027	0,0021
Rypsin ja rapsin korsi	1,9587	0,0106	0,0285	0,0009	0,0001	0,0048	0,0031	0,0025

Taulukko 50. Viljan oljen sekä rypsin ja rapsin korren kuljetusten päästöt (g/MJ) kuljetusmatkan ollessa 80 kilometriä. Paluukuormien oletetaan olevan tyhjiä.

Paalityyppi	CO ₂	CO	NO _x	N ₂ O	CH ₄	SO ₂	PM
Suurkanttipaali, 0,7 m	0,60	0,0002	0,007	0,00002	0,00001	0,00001	0,00008
Suurkanttipaali, 0,9 m	0,62	0,0002	0,007	0,00002	0,00001	0,00001	0,00009
Orkel-paalaimen paali	0,53	0,0002	0,006	0,00002	0,00001	0,00001	0,00007

Taulukko 51. Viljan oljen ja rypsin korren korjuun kompensoimiseksi käytettävien lannoitteiden aiheuttamat päästöt (g/MJ). Tällä vaihtoehdolla ei kuitenkaan saada korvattua kaikkea oljen korjuun seurauksena menetettävää kaliumia.

Ketju	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NH ₃	NO _x	SO ₂	NMVOC
Viljan olki	0,752	0,002	0,003	0,0001	0,001	0,001	0,0002
Rypsin ja rapsin korsi	1,101	0,003	0,004	0,0002	0,002	0,002	0,0003

Taulukko 52. Olki- ja korsiketjujen ympäristövaikutusarviot.

Ympäristövaikutus	Viljan olki	Rypsin ja rapsin korsi
Ilmastonmuutos, CO ₂ -ekv., kg/MJ	0,0041	0,0048
Happamoituminen, AE-ekv., mg/MJ	84,6	85,9
Troposfäärin otsonin muodostuminen, person ppm h/ MJ	4,48 x 10 ⁻⁵	1,54 x 10 ⁻⁵
Rehevöityminen vesistöissä, PO ₄ -ekv., mg/MJ	1,84	1,92

Taulukko 53. Viljan olki- ja rypsin korsiketjujen primäärienergian kulutukset.

Ketjun vaihe	Primäärienergian kulutus, MJ/MJ	
	Viljan olki	Rypsin korsi
Lannoitteiden valmistus	0,0127	0,0186
Korjuu	0,0016	0,0019
Kuljetukset	0,0086	0,0086
Yhteensä	0,0229	0,0291