



Johanna Kirkinen, Sampo Soimakallio,
Tuula Mäkinen, Paterson McKeough & Ilkka Savolainen

Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset

Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset

Johanna Kirkinen, Sampo Soimakallio, Tuula Mäkinen,
Paterson McKeough & Ilkka Savolainen

ISBN 978-951-38-6976-2 (nid.)
ISBN 978-951-38-6978-6 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1235-0605 (nid.)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
Copyright © VTT 2007

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Toimitus Leena Ukkoski

Edita Prima Oy, Helsinki 2008

Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset [The greenhouse impact of the production and use of peat-based F-T-diesel]. Espoo 2007. VTT Tiedotteita – Research Notes 2418. 45 s.

Avainsanat transportation fuels, substitution, biofuels, environmental impacts, climatic change, greenhouse impacts, life cycle assessment, radiative forcing, biodiesel, biomass, peat, logging residues, reed canary grass, gasification

Tiivistelmä

Liikennepolttoaineiden korvaaminen biopohjaisilla polttoaineilla on yhtenä keinona ilmastonmuutoksen hillinnässä ja öljyriippuvuuden vähentämisessä. Suomessa kehitetään biomassan kaasutukseen perustuvia synteettisen biodieselin, ns. Fischer-Tropsch-dieselin, tuotantotekniikoita. Yhtenä raaka-aineena F-T-dieseliin on mahdollista käyttää turvetta, mikä herättää paljon mielenkiintoa Suomen suurten turvevarojen takia. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutusta elinkaarinäkökulmasta. Turpeen ja turvemaan eri hyödyntämistapauksille laskettuja ketjuja verrattiin fossiiliseen dieseliin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaiseen F-T-dieseliin. Kasvihuonevaikutuksen arvioimiseen käytettiin säteilypakotetta. Työssä laskettiin kasvihuonevaikutus useissa tuotantoketjuissa käyttäen erilaisia oletuksia. Työssä ei arvioitu eri oletusten realistisuutta. Laskennallisina tarkasteluaikajänteinä käytettiin 100 ja 300 vuotta.

Turvepohjainen F-T-diesel on ilmastovaikutukseltaan tarkastelun rajoista, lähtötilanteesta ja jälkikäytöstä riippuen vaihtelevassa asemassa verrattuna fossiiliseen dieseliin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaiseen F-T-dieseliin. Useissa ketjuissa kasvihuonevaikutus on fossiilista dieseliä suurempi. Jos turve tuotetaan suopelloilta, jotka ovat voimakkaita kasvihuonekaasujen päästölähteitä, on kasvihuonevaikutus pienempi kuin, jos turve tuotetaan metsäojitetuilta soilta. Jos aluetta hyödynnetään turvetuotannon jälkeen kasvattamalla siinä metsää tai viljelemällä ruokohelpeä ja jälkikäytössä tuotettu biomassa hyödynnetään edelleen F-T-dieseliksi, alenee ketjussa tuotetun F-T-dieselin hyödyntämisen kokonaisvaikutus. Fossiiliseen dieseliin verrattuna turvepohjaisen F-T-dieselin aiheuttama kasvihuonevaikutus on pitkällä tarkasteluajalla alhaisempi siinä tapauksessa, että turve tuotetaan suopelloilta.

Käytetyn turvevaran lisäksi merkittävimmin turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutukseen vaikuttavat polttoaineen prosessointi (mukaan lukien häviöt ja käytetty sähkö) ja loppukäyttö. Prosessissa käytetyn sähkön tuottamisessa aiheutuvilla päästöillä on suuri vaikutus kasvihuonevaikutukseen. Tavallisesti uudessa sähköä kuluttavassa toiminnassa kuluttava sähkö on arvioitava marginaalisähköksi, mutta tietyissä erikoistapauksissa myös marginaalisähköstä poikkeava vähäpäästöinen sähkö voisi tulla kyseeseen. Tässä tutkimuksessa prosessissa kulutettavan sähkön tuotannossa syntyvät päästöt arvioitiin sekä

nykyisen tyypillisen marginaalisähkön että nollapäästöisen sähkön mukaan, jotta sähkön tuotannon päästöjen merkitys tulisi selvästi tuloksissa esille. Turvepohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutus metsäteollisuuden integroidussa tuotannossa on fossiilista dieseliä pienempi, kun tuotannossa oletetaan käytettävän nollapäästöistä sähköä ja turvemaata hyödynnetään liikennepolttoaineiden tuottamiseen kokonaisvaltaisesti, siis tuotetaan ensin turve-F-T-dieseliä ja jälkikäytössä (metsitys) syntynyttä puubiomassaa jalostetaan myös F-T-dieseliksi.

Työssä arvioitiin myös hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) hyödyntämistä F-T-dieselin tuotannossa. Kansainvälinen ilmastopaneeli on listannut CCS:n yhdeksi merkittäväksi ilmastomuutoksen hillinnän keinoksi tulevaisuudessa. F-T-dieselin tuotantoprosessissa erotetaan hiilidioksidia prosessiteknisistä syistä, ja erotetusta hiilidioksidista (häviöstä) on mahdollista saada talteen suuri osa, mikä vähentää biomassapohjaisen (turve, metsätähde ja ruokohelpi) F-T-dieselin kasvihuonevaikutusta. Jos F-T-dieselin tuotantoon on sisällytetty CCS, vähenee 300 vuoden tarkasteluajalla turve- ja biomassapohjaisen F-T-dieselin tuotannon kasvihuonevaikutus fossiilisen dieselin vaikutuksen tasolle tai sen alle ketjusta riippuen.

Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset [The greenhouse impact of the production and use of peat-based F-T-diesel]. Espoo 2007. VTT Tiedotteita – Research Notes 2418. 45 p.

Keywords transportation fuels, substitution, biofuels, environmental impacts, climatic change, greenhouse impacts, life cycle assessment, radiative forcing, biodiesel, biomass, peat, logging residues, reed canary grass, gasification

Abstract

Substituting transportation fuels with biomass-based fuels is presented as one of the options in climate change mitigation and reducing dependency on fossil oil. In Finland, production techniques of synthetic biodiesel have been developed which are based on the gasification of biomass (i.e. Fischer-Tropsch diesel). As a raw material for F-T-diesel production, peat can be used, which raises a lot of interest due to the large peat reserves in Finland. In this study, the greenhouse impact of peat-based F-T-diesel from the life cycle point of view was assessed. The utilisation chains of peat and peatlands assessed were compared to fossil diesel and F-T-diesel based on logging residues and reed canary grass. The greenhouse impact is assessed by radiative forcing. In this study, the greenhouse impact of different production chains was calculated using different assumptions. The reality of different assumptions was not assessed. Computational time spans were 100 and 300 years.

The impact of peat-based F-T-diesel on the climate depends on the system boundaries, the initial situation and the after-treatment, and it varies when compared to the climate impact of fossil diesel as well as logging residues and reed canary grass-based fuels. Greenhouse gas impact of peat-based F-T-diesel is higher compared to fossil diesel in many of the chains considered. If peat is produced from cultivated peatlands, which are powerful sources of greenhouse gases, the greenhouse impact is lower than if peat is produced from forestry-drained peatland. If peatland is utilised after peat production for afforestation or cultivation of reed canary grass and the produced biomass is then utilised for F-T-diesel, it lowers the total greenhouse impact of the F-T-diesel produced in the certain chain. When peat-based F-T-diesel is compared to fossil fuel, the greenhouse impact is lower when the peat is produced from the cultivated peatland.

In addition to peat resource utilised the most remarkable impact on the greenhouse impact of peat-based F-T-diesel is the processing of fuel (losses and electricity) and end-use. The greenhouse gas emissions from the production of the electricity used in the production process of F-T-diesel have a major impact on the total greenhouse impact. Usually in a new function, which consumes electricity, the used electricity should be considered as marginal electricity, but in certain special cases, the used electricity can

be low-emission electricity. In this study, the used electricity in the F-T-diesel refining process was assessed to be both current typical marginal electricity and zero-emission electricity, which enables us to emphasize the impact of the emissions due to the electricity used. The greenhouse impact of the peat-based F-T-diesel produced as an integrated production in the forest industry plant is lower than fossil fuels, when zero-emission electricity is used in the process and peatland is used comprehensively in F-T-diesel production, i.e. first peat-F-T-diesel is produced and then biomass produced in the after-treatment (afforestation) is also processed as F-T-diesel.

The use of carbon capture and storage in the F-T-diesel production process was also assessed. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has listed CCS as one of the significant means to mitigate climate change in the future. In the production of F-T-diesel, carbon dioxide is separated in the process and major part of the separated CO₂ (losses) can be captured, which reduces the greenhouse impact of biomass-based (peat, logging residues and reed canary grass) F-T-diesel. If CCS is included in the F-T-diesel production, it decreases the greenhouse impact of peat and biomass-based F-T-diesel to the same level of impact as that of fossil diesel or below depending on the F-T-diesel production chain.

Alkusanat

Liikennepolttoaineiden korvaaminen biopohjaisilla polttoaineilla on yhtenä keinona ilmastonmuutoksen hillinnässä ja öljyriippuvuuden vähentämisessä. Suomessa kehitetään biomassan kaasutukseen perustuvia synteettisen biodieselin, ns. Fischer-Tropsch-dieselin, tuotantotekniikoita. Yhtenä raaka-aineena F-T-dieseliin on mahdollista käyttää turvetta, mikä herättää paljon mielenkiintoa Suomen suurten turvevarojen takia. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutusta elinkaarinäkökulmasta.

Tarkastelu aloitettiin Tekesin rahoittaman ClusterTech-hankkeen case-tarkasteluna ja sitä jatkettiin Vapo Oy:n toimeksiantona. ClusterTech-hankkeessa joukko suomalaisia metsä-, energia-, konepaja- ja kemianteollisuuden yrityksiä kehitti tulevaisuutta varten uusia liiketoimintamalleja ja teknologiakonsepteja. Työ tehtiin 18.12.2006–30.10.2007.

Projektiryhmän pääjäsenet olivat tutkija Johanna Kirkinen, tutkija Sampo Soimakallio, tutkimusprofessori Ilkka Savolainen, erikoistutkija Tuula Mäkinen projektipäällikkönä sekä johtava tutkija Paterson McKeough, kaikki VTT:stä. Kiitämme kehitysjohtaja Kari Mutkaa Vapo Oy:stä sekä tutkimusjohtaja Kai Sipilää ja teknologiapäällikkö Satu Helystä VTT:ltä saamistamme hyödyllisistä kommentteista ja neuvoista.

Espoo, joulukuu 2007

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	5
Alkusanat.....	7
1. Johdanto.....	9
2. Tavoite.....	11
3. Tutkimusmenetelmät.....	12
3.1 Säteilypakote.....	12
3.2 Elinkaarianalyysi.....	13
3.2.1 Turvepohjaisen F-T-dieselin elinkaari.....	13
3.2.2 Metsätähdepohjaisen F-T-dieselin elinkaari.....	15
3.2.3 Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin elinkaari.....	16
3.2.4 Fossiilisen dieselin elinkaari.....	16
3.3 Kasvihuonevaikutuksen laskeminen.....	17
4. Tarkasteltavat polttoaineketjut.....	19
5. Lähtöarvot ja oletukset.....	21
5.1 Sähkö.....	21
5.2 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS).....	23
5.3 Fossiilinen diesel.....	24
5.4 Hakkuutähdepohjainen F-T-diesel.....	24
5.4.1 Hakkuutähde-F-T-dieselin tuotanto ja käyttö.....	24
5.4.2 Vertailutilanne: hakkuutähteiden hajoaminen.....	25
5.5 Ruokohelpipohjainen F-T-diesel.....	26
5.6 Turvepohjainen F-T-diesel.....	27
5.6.1 Metsäojitettu suo ja suopelto.....	27
5.6.2 Turpeen tuotanto.....	27
5.6.3 Turpeen jalostus F-T-dieseliksi sekä turve-F-T-dieselin loppukäyttö.....	28
5.6.4 Jälkikäsittelyvaihtoehdot.....	29
6. Tulokset.....	31
7. Pohdinta.....	39
8. Yhteenveto.....	41
Lähdeluettelo.....	43

1. Johdanto

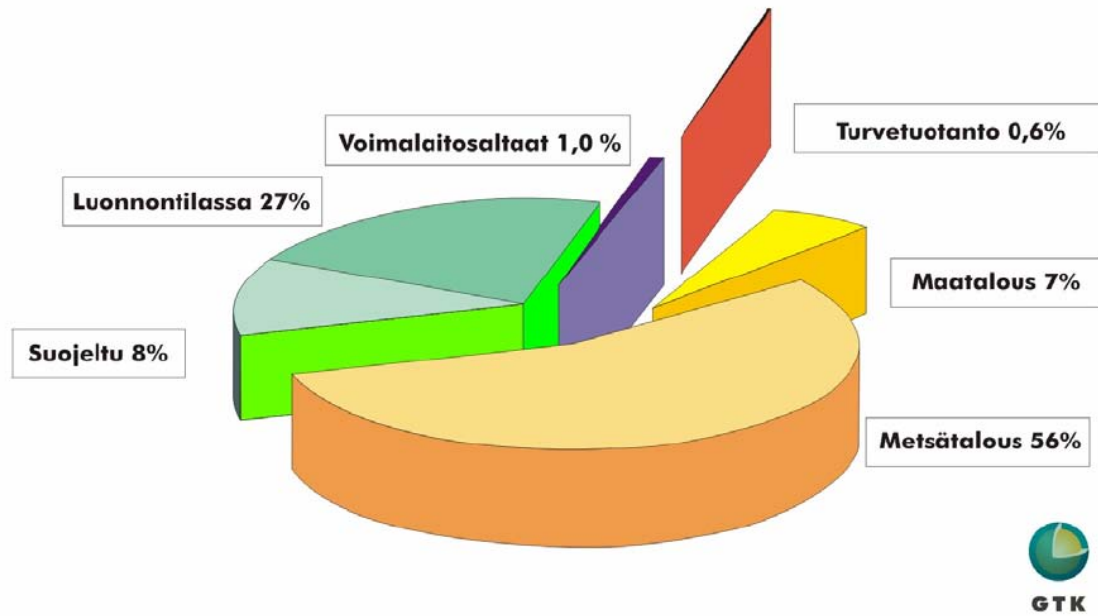
Kansainvälinen ilmastopaneeli IPCC on vuonna 2007 toukokuun alussa julkistanut yhteenvedonsa päättäjille ilmastomuutoksen hillitsemisestä (IPCC 2007b). Raportissa yhdeksi tärkeimmistä hillintätoimenpiteistä liikennesektorilla mainittiin biopolttoaineet. Biopolttoaineiden tuotanto ja käyttö ovat kiinnostuksen kohteena myös Suomessa, ei ainoastaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen keinona, vaan myös yhtenä keinona vähentää Suomen öljyriippuvuutta. Suomessa kiinnostus biopolttoaineisiin ja niihin liittyviin liiketoimintamahdollisuuksiin liittyy myös energia- ja metsäteollisuuden tulevaisuuteen sekä haja-asutusalueiden työllisyyteen. EU:n tavoitteena on, että vuoteen 2010 mennessä 5,75 % liikenteen polttoaineista olisi biopohjaisia (EU:n direktiivi 2003/30/EY). Osuus tulee nosta 10 %:iin vuoteen 2020 mennessä.

EU:n komissio esittää biopolttoainestrategiassaan (COM(2006) 34 final), että tulevaisuudessa vain biopolttoaineet, jotka täyttävät biopolttoaineiden kestäväälle kehitykselle asetetut vaatimukset, huomioidaan täytettäessä liikenteen biopolttoaineiden käytölle asetettuja vaatimuksia. Biopolttoaineiden edistämistä koskevassa raportissaan (COM(2006) 845 final) EU:n komissio painottaa, että tarvitaan menetelmiä, joilla voidaan varmistaa biopolttoaineiden ympäristömyönteisyys. On tärkeää tunnistaa, mitkä liikenteen biopolttoaineista ja niiden tuotantomenetelmistä täyttävät ilmastollisen kestävyden mukaiset vaatimukset.

Turve on Suomessa herättänyt mielenkiintoa liikenteen polttoaineiden raaka-aineena. Turvevarat sekä mahdollinen turpeen uusiutuvuus luonnontilaisissa soissa ovat olleet keskustelun aiheena biopolttoainemahdollisuuksia punnittaessa. Turvetta käytetään Suomessa tällä hetkellä lähinnä sähkön ja lämmön tuotantoon. Turpeen osuus energian kokonaiskulutuksessa on ollut vuosina 2003–2005 noin 5–7 %. Vuonna 2005 turpeen energiakäyttö oli noin 19 TWh (Tilastokeskus 2007). Suomen soiden ennustettu käyttökelpoinen kokonaisenergiäsältö on noin 13 000 TWh (Virtanen et al. 2003). Turvetta käytetään pääasiassa yhdistetyissä sähkön ja lämmön tuotantolaitoksissa yhdessä puubiomassan kanssa. Turvetuotannossa on noin 53 000 hehtaaria eli 0,6 % koko suomalasta (Kuva 1).

Suomessa liikenteen biopolttoaineiden kasvihuonekaasutaseita on tutkittu viime vuonna valmistuneessa VTT:n ja MTT:n yhteishankkeessa (Mäkinen et al. 2006). Hankkeessa tutkittiin sekä kaupallisia että kehitteillä olevia tekniikoita pelto- ja metsäbiomassapohjaisille raaka-aineille. Kaupallisista ketjuista tarkasteltiin ohraetanolia ja rypsipohjaista biodieseliä (RME). Kehitteillä olevista tekniikoista tarkasteltiin metsätähde- tai ruokohelpipohjaista Fischer-Tropsch-dieseliä sekä metsätähdepohjaista metanolia. Turpeen kasvihuonevaikutusta energiantuotannossa on tutkittu pääosin Suomessa ja Ruotsissa (mm. Kirkinen et al. 2007a, Kirkinen et al. 2007b, Holmgren et al. 2006, Nilsson & Nilsson 2004, Uppenberget al. 2001, Savolainen et al. 1994).

SOIDEN KÄYTTÖ SUOMESSA



Kuva 1. Soiden käyttö Suomessa (Virtanen et al. 2003).

2. Tavoite

Työn tavoitteena oli tarkastella eri turvepohjaisten Fischer-Tropsch-dieseliin kasviuonevaikutuksia ja verrata niitä aiemmassa tutkimuksessa Mäkinen et al. (2006) laskettuihin fossiiliseen dieseliin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaiseen F-T-dieseliin. Tutkimuksessa käytettiin kasviuonevaikutuksen arvioimisessa säteilypakotetta, joka huomioi mm. kasviuonevaikutuksen dynaamisuuden sekä kasviuonekaasujen poistumisen ilmakehästä ajan funktiona. Aiemmassa tutkimuksessa käytettiin globaalia lämmityspotentiaalia (GWP-kertoimia) kasviuonevaikutuksen arvioimisessa. Vertailtavuus tutkimuksen Mäkinen et al. (2006) kanssa saavutettiin laskemalla fossiilisen dieselin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kasviuonevaikutus ja käyttämällä niitä vertailukohtana.

Tarkastelussa oletettiin, että turve tuotetaan joko metsäojitetulta tai viljelykäytössä olevalta suolta (suopelloilta). Nämä suot ovat kasviuonekaasujen päästölähteitä. Erityisesti suopeltojen hyödyntäminen olisi edullista, sillä suopellot ovat merkittävä kasviuonekaasupäästöjen lähde. Nämä päästöt lakkaavat, kun alue otetaan turpeen tuotantoon (mm. Kirkinen et al. 2007a, 2007b). Turvetuotantoalueiden jälkikäsitteilyvaihtoehtoina ovat soistaminen, eli tuotantoalueen muuttaminen toimivaksi suoekosysteemiksi, ja tuotantoalueen hyödyntäminen biomassan tuotantoon. Vaihtoehtoina tässä työssä on joko alueen metsitys tai ruokohelven viljely alueella. Tutkimuksessa tarkasteltiin metsitystä turvetuotantoalueen pohjan jälkikäsitteilymuotona kahdella seuraavalla oletuksella: turvemaahan hyödynnetään kokonaisvaltaisesti liikenteen polttoaineiden tuotantoon, eli energiatuotannon jälkeen alueella kasvanut puubiomassa hyödynnetään F-T-dieseliksi, tai syntynyttä puubiomassaa ei huomioida suoraan turvemaan hyödyntämisessä, vaan puubiomassa hyödynnetään muulla tavoin (puu käytetään muihin teollisuuden tarpeisiin).

Turpeen tuotannon ja tuotantoalueen jälkikäytön lisäksi työssä tarkasteltiin erilaisia prosessitekniisiä tapauksia. F-T-prosessissa käytetyn sähköntuotannon päästökertoimen vaikutusta kokonaiskasviuonevaikutukseen arvioitiin olettamalla sähköntuotannon olevan marginaalisähköä tai nollapäästöistä sähköä. Lisäksi arvioitiin F-T-prosessiin kytketyn hiidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS, Carbon Capture and Storage) vaikutusta. Yhtenä tapauksena tutkittiin sitä, millainen vaikutus kasviuonetaseeseen on, jos F-T-dieseliä tuotetaan itsenäisesti (ns. stand-alone-laitos) eli tuotantoa ei ole integroitu esim. metsäteollisuudessa toimivaan laitokseen.

3. Tutkimusmenetelmät

Kasvihuonevaikutusta arvioitiin säteilypakotteella, jota kuvataan tarkemmin kohdassa 3.1. Kasvihuonevaikutuksen laskennassa huomioidaan vain ihmisen aiheuttama vaikutus ilmastoon. Eri liikenteen polttoaineketjujen kasvihuonevaikutuksen laskemisessa käytettiin elinkaarianalyysia yhtäläisesti aiempien liikenteen polttoaineiden sekä turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutuslaskelmiin nähden (kohta 3.2).

3.1 Säteilypakote

Tässä työssä kasvihuonevaikutusta mitattiin säteilypakotteella. Kasvihuonekaasujen pitoisuuden kasvu ilmakehässä vähentää avaruuteen karkaavaa säteilyä ja lämmittää näin maapallon ilmastoa. Säteilypakote kuvaa ilmakehän kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutusta, eli sitä muutosta, jonka kaasun pitoisuuden kasvu aiheuttaa maapallon energiataaseissa. Tätä taseen muutosta nimitetään säteilypakotteeksi ja se ilmaistaan yleensä tehona pinta-alayksikköä kohden (W/m^2). Positiivisella säteilypakotteella on maapallon ilmastoa lämmittävä, negatiivisella säteilypakotteella taas viilentävä vaikutus (IPCC 2007a).

Aiemmassa liikennepolttoaineiden kasvihuonevaikutuksia tutkineessa hankkeessa (Mäkinen et al. 2006) vaikutuksen arvioimiseen käytettiin GWP-kertoimia (Global Warming Potential). GWP-kertoimia käytetään useissa yhteyksissä johtuen niiden käytön yksinkertaisuudesta. GWP-kertoimilla pystytään vertaamaan ja yhdistämään eri kasvihuonekaasupäästöjä kohtuullisella tarkkuudella. IPCC on sopinut, että kasvihuonekaasuinventaarissa käytetään sadan vuoden kertoimia¹. Säteilypakote on kuitenkin tarkempi menetelmä kasvihuonevaikutuksen arvioimiseen kuin GWP-kertoimet. Säteilypakote huomioi kasvihuonekaasupäästöt ja nielut ajan funktiona. Säteilypakotteella tarkastelu on dynaaminen, ja erityisesti turpeen tarkastelussa se huomioi ajanjaksot, jotka vaikuttavat kasvihuonevaikutukseen eri aikaväleillä. Muita säteilypakotteen etuja GWP-kertoimeen verrattuna on, että se ottaa suoraan huomioon metaanin (CH_4) ja typpioksiduulin (N_2O) poistumisen ilmakehästä myös ajan funktiona. Vertailukelpoisuus tämän työn ja aiemman liikennepolttoainetutkimuksen välillä saavutetaan laskemalla fossiilinen dieselin ja metsätähde- sekä ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutus, kuten tutkimuksessa Mäkinen et al. (2006), ja käyttämällä kasvihuonevaikutuksen arvioimiseen säteilypakotetta. Säteilypakotteen arvioimisessa käytetään REFUGE-laskentamallia (mm. Monni et al. 2004).

Säteilypakotetta on käytetty monissa aiemmissa turpeen energiakäytön kasvihuonevaikutusta koskevissa tutkimuksissa (mm. Kirkinen et al. 2007a, 2007b, Savolainen et al.

¹ GWP-kertoimilla muutetaan metaani (CH_4) ja dityppioksidi (N_2O) CO_2 -ekvivalenteiksi. Sadan vuoden tarkasteluajalla metaani vaikuttaa 21-kertaisesti ja dityppioksidi 310-kertaisesti verrattuna hiilidioksidiin (Ilmastopöytäkirjalle tehtävässä raportoinnissa käytettävät lukuarvot).

1994). Kasvihuonevaikutuksen yksikkönä käytetään suhteellista säteilypakotetta ($E_{\text{abs}}/E_{\text{po}}$), joka on elinkaaren päästöjen ja nielujen aiheuttama kumulatiivinen säteilypakote. Kumulatiivinen säteilypakote on energia, joka on absorboitunut maapallon termodynaamiseen järjestelmään (E_{abs}) jaettuna polttoaineen energialla (E_{po} , funktionaalinen yksikkö, jota kohti tulos esitetään). Tämä yksikkö lasketaan säteilypakotteesta (W/m^2), joka integroidaan maapallon pinta-alan yli tuotettua energiaa kohden (Kirkinen et al., toimitettu julkaistavaksi).

3.2 Elinkaarianalyysi

Elinkaarianalyysissä otetaan tarkasteluun mukaan kaikki tuotteen positiiviset ja negatiiviset ympäristövaikutukset koko tuotteen elinkaaren ajalta sovitulla tarkastelun rajauksella. Elinkaarianalyysi pohjautuu standardiin ISO 14040 (ISO 14040 1997). Standardi koostuu neljästä eri osasta: 1. Analyysin tavoitteen ja laajuuden määrittäminen, 2. Tiedon analysointi eli inventaarioanalyysi, 3. Vaikutusten arvioiminen ja 4. Tulosten tulkitseminen. Myös raportointi ja kriittinen arviointi ovat osana elinkaarianalyysiä. Tämä tutkimus hyödyntää em. standardia kasvihuonevaikutusten arvioinnin osalta seuraavasti. Tavoitteet luetellaan luvussa 2. Inventaarioanalyysi koskee eri liikennepolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjä ja -nieluja eri elinkaaren vaiheissa (luku 5). Kasvihuonevaikutusta arvioidaan säteilypakotteella. Tulokset sekä eri herkkyystarkastelut (sähköntuotannon päästöjen vaikutus, CCS:n hyödyntäminen) esitetään luvussa 6.

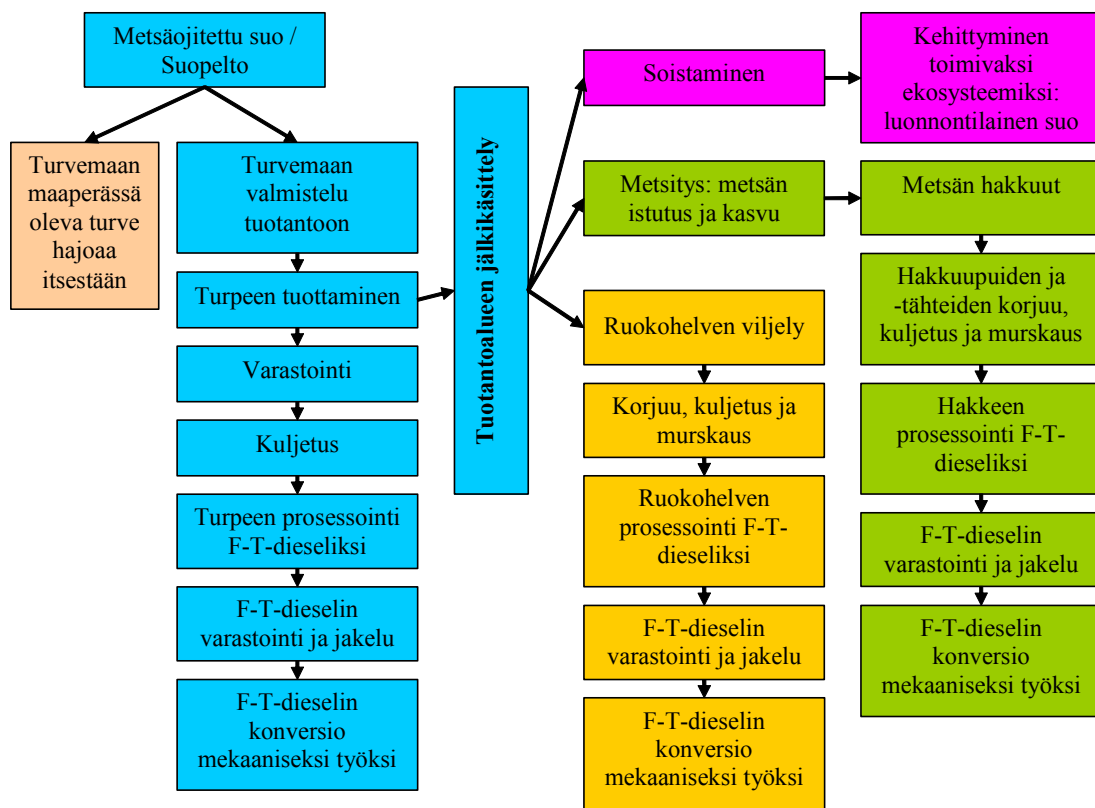
Tutkimus on rajoitettu polttoaineketjujen kasvihuonevaikutuksen arviointiin merkittävimmistä kasvihuonekaasuvirroista. Käsitellyissä polttoaineketjuissa otetaan huomioon kaikkien eri elinkaaren vaiheiden hiilidioksidi- (CO_2), metaani- (CH_4) ja dityppioksidi-päästöt (N_2O) sekä mahdolliset nielut (kaasujen sitoutuminen). Muun muassa työkoneiden valmistuksen, infrastruktuurin ja jalostuslaitosten rakentamisen päästöjä ei ole kuitenkaan otettu huomioon. Ne on sivuutettu myös tarkasteltujen fossiilisten polttoaineiden päästöarvioissa.

3.2.1 Turvepohjaisen F-T-dieselin elinkaari

Turvepohjaisissa F-T-diesel-tarkasteluissa elinkaari rajattiin kolmella eri tavalla (kuva 2). Turve-F-T-dieselin lähtökohtina on turpeen tuottaminen joko metsäojitetulta tai viljelyskäytössä olevalta suolta (suopelto). Jos näitä aloja ei oteta turvetuotantoon, hajoaa maaperässä oleva turve itsestään ja aiheuttaa näin kasvihuonekaasupäästöjä (kuvassa 2 ruskea laatikko). Osassa käsitellyistä ketjuista otetaan huomioon vain alueelta tuotetun turpeen hyödyntäminen (siniset laatikot). Osassa ketjuissa otetaan huomioon turvemaan hyödyntäminen liikennepolttoaineiden tuotantoon kokonaisvaltaisesti, eli ensiksi alueelta tuotetaan turvetta F-T-dieselin raaka-aineeksi, jonka jälkeen aluetta hyödynnetään joko uusiu-

tuvan puubiomassan tuotantoon tai ruokohelven viljelyyn (vihreät ja keltaiset laatikot), jotka edelleen hyödynnetään F-T-dieseliksi. Turvetuotantoalue voidaan myös turpeen tuotannon jälkeen ennallistaa eli soistaa toimivaksi suoekosysteemiksi (violetit laatikot).

Turvemaa valmistellaan tuotantoon, jonka jälkeen turve tuotetaan. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kahta eri turpeentuotantomenetelmää, nykyistä jyrshinturvemenetelmää sekä uutta kehitteillä olevaa turpeentuotantomenetelmää (biomassakuivuri), jota kehittävät Suomessa yhdessä Vapo Oy ja VTT. Turpeen tuotannon jälkeen turve varastoidaan ja kuljetetaan tuotantolaitokselle, jossa turve prosessoidaan F-T-dieseliksi. Varastoinnin ja jakelun jälkeen viimeisenä tarkasteluvaiheena on polttoaineen konversio hyötyenergiaksi.

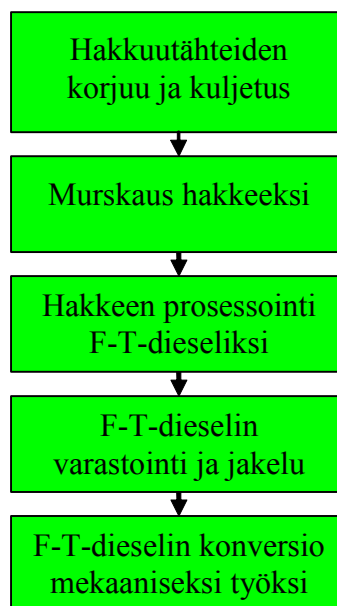


Kuva 2. Turvepohjaisen F-T-dieselin elinkaaren kasvihuonevaikutustarkastelun raja. Tarkastelussa huomioidaan metsäojitettu suo ja suopelto (viljelyksessä oleva suo), jotka ovat kasvihuonekaasujen päästölähteitä. Jos näitä maita ei hyödynnetä turpeen tuotantoon, maaperässä oleva turve hajoaa aiheuttaen päästöjä (vaaleanruskea laatikko). Pelkkä turpeen hyödyntäminen F-T-dieselin tuotantoon rajaa elinkaaren koskemaan sinisiä laatikoita. Jos turvemaa käytetään kokonaisvaltaisesti F-T-dieselin tuotantoon, eli ensin alueelta tuotetaan turvepohjaista F-T-dieselä ja sen jälkeen metsityksestä tai ruokohelven viljelyksestä saatu biomassa jalostetaan F-T-dieseliksi, laajentuu elinkaari koskemaan myös vihreitä ja keltaisia laatikoita. Jos turvetuotantoalue halutaan tuotannon jälkeen soistaa, kuuluvat elinkaareen violetit laatikot.

Turpeen tuotannon jälkeen turvetuotantoalueen pohja voidaan joko ennallistaa toimivaksi suoekosysteemiksi tai hyödyntää edelleen. Jos aluetta halutaan hyödyntää biomassan tuotantoon, jälkikäyttövaihtoehtoina on tässä työssä tarkasteltu metsitystä ja ruokohelven viljelyä. Kun elinkaaren rajaus käsittää mukanaan myös syntyvän puubiomassan tai ruokohelven hyödyntämisen F-T-dieseliksi, huomioidaan myös metsänistutuksen, -hoidon ja -hakkuiden sekä ruokohelven viljelyn ja korjuun vaikutukset.

3.2.2 Metsätähdepohjaisen F-T-dieselin elinkaari

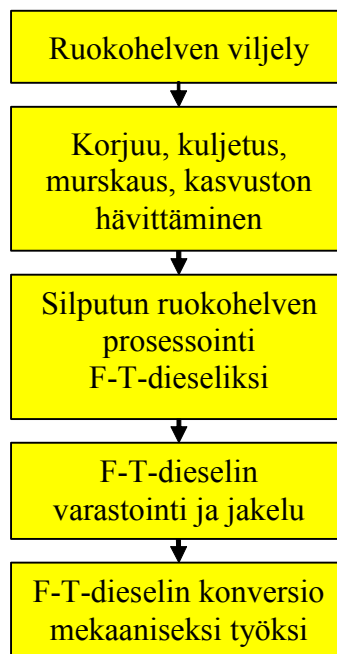
Metsätähde-F-T-dieselin elinkaaren kasvihuonevaikutuksen arvioimisessa huomioidaan vain hakkuutähteiden hyödyntäminen F-T-dieseliksi (kuva 3). Metsänistutus ja -hoito sekä harvennus ja päätehakkuut on rajattu tarkastelusta pois. Oletuksena on, että metsää kasvatetaan mm. metsäteollisuuden ja rakennusteollisuuden tarpeiksi ja metsätähteet ovat tästä saatava sivutuotevirta kuitu- ja tukkipuun lisäksi. Metsätähde-F-T-dieselin elinkaari alkaa hakkuutähteiden korjuusta ja kuljetuksesta. Kerätyt hakkuutähteet murskataan hakkeeksi. Hakkuutähteiden korjaus, kuljetukset sekä murskaus synnyttävät päästöjä työkooneiden käytön kautta. Hake prosessoidaan F-T-dieseliksi. F-T-dieselin varastointi ja jakelu sekä dieselin muuntaminen hyötyenergiaksi ovat elinkaaren viimeiset vaiheet.



Kuva 3. Metsätähdepohjaisen F-T-dieselin elinkaaren kasvihuonevaikutustarkastelun rajaus. Metsätähteet syntyvät sivutuotevirtana muihin tarkoituksiin (mm. metsäteollisuus) kasvatetun metsän hyödyntämisen ohella, jolloin huomioidaan vain tähteiden korjuu sekä kuljetus (metsän istutuksesta ja hoidosta aiheutuneita päästöjä ei huomioida). Metsätähteet murskataan hakkeeksi, jonka jälkeen hake prosessoidaan F-T-dieseliksi, joka varastoinnin ja jakelun jälkeen muutetaan hyötyenergiaksi.

3.2.3 Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin elinkaari

Ruokohelpeä F-T-dieselin raaka-aineena on tutkittu mm. Mäkisen et al. (2006) tutkimuksessa. Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin elinkaari alkaa ruokohelven viljelystä (kuva 4). Ensiksi ruokohelpi korjataan ja paalataan. Paalit kuljetetaan laitokselle, jossa ne murskataan silpuksi. Elinkaareissa huomioidaan myös kasvuston hävittäminen. Silputtu ruokohelpi prosessoidaan F-T-dieseliksi, joka varastoidaan ja jaellaan edelleen käyttöön. Viimeisenä vaiheena on F-T-dieselin hyödyntäminen energiaksi. Elinkaareissa syntyy päästöjä mm. työkoneiden käytön kautta (viljely, niitto, paalaus, silppuaminen, kuljetukset). Myös viljelyksessä tarvittavien lannoitteiden valmistukset ja kuljetukset on huomioitu elinkaareissa.



Kuva 4. Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin elinkaaren kasvihuonevaikutustarkastelun rajaus. Ruokohelpi-F-T-dieselin elinkaareissa huomioidaan ruokohelven viljely, jolloin tarkasteluun sisällytetään myös viljelystä aiheutuneet päästöt (mm. lannoitteiden valmistus). Ruokohelpikasvusto korjataan ja paalataan. Paalit kuljetetaan laitokselle, murskataan ja prosessoidaan edelleen F-T-dieseliksi. Ruokohelpi-F-T-dieselin elinkaaren viimeisinä vaiheina ovat varastointi, jakelu käyttöön ja muunto hyötyenergiaksi.

3.2.4 Fossiilisen dieselin elinkaari

Fossiilisen dieselin elinkaaren vaiheet alkavat raakaöljyn tuottamisesta ja prosessoimisesta (kuva 5). Tarkastelussa käytettävät oletukset ja lähtöarvot ovat Mäkisen et al. (2006) tutkimuksessa käytetystä Edwards et al. (2003) -raportista. Tällä hetkellä fossii-

linen dieselöljy hankitaan EU-alueelle pääasiassa Euroopasta ja Lähi-idästä. Suomeen raakaöljy tuodaan pääosin Venäjältä. Raakaöljyn kuljetuksen ja jalostuksen jälkeen valmiiksi jalostetut polttoaineet kuljetetaan jalostamoilta jakeluasemille. Viimeisenä elinkaaren vaiheena on polttoaineen konversio hyötyenergiaksi yhtäläisesti muiden polttoaineiden elinkaarten kanssa.



Kuva 5. Fossiilisen dieselin elinkaaren kasvihuonevaikutustarkastelun rajaus. Raakaöljyn tuotannon ja kuljetuksen jälkeen raakaöljy jalostetaan dieseliksi. Diesel kuljetetaan, varastoidaan ja jaellaan kuluttajille. Viimeisenä elinkaaren vaiheena huomioidaan dieselin konversio hyötyenergiaksi.

3.3 Kasvihuonevaikutuksen laskeminen

Kasvihuonevaikutuksen laskennassa huomioidaan ihmisen ja tarkastellun toiminnan aiheuttama muutos ilmastoon. Liikennepolttoaineiden elinkaaren kasvihuonevaikutus I lasketaan seuraavalla kaavalla 1:

$$I = I_U - I_R, \quad (1)$$

missä I_U tarkoittaa polttoaineen tuotannon hyödyntämisen kasvihuonevaikutusta (vaikutus mm. tuotannosta, työkoneista, kuljetuksista ja hyödyntämisestä). I_R tarkoittaa referenssi- eli vertailutilanteen päästöjä. Turve- ja metsätähdepohjaisissa F-T-dieselin tuotantoketjuissa tämä tarkoittaa ilmastovaikutusta, joka tapahtuisi, jos ihminen ei hyödyntäisi näitä luonnonvaroja. Tällöin luonnontilassa olevien metsäojittettujen soiden ja suo- peltojen turvekerros hajoaisi vähitellen tuottaen päästöjä. Jos taas metsätähteitä ei kerät- täisi ja hyödynnettäisi, jäisivät ne metsään ja hiljalleen hajoaisivat aiheuttaen päästöjä. Fossiilisen dieselin ja ruokohelppi-F-T-dieselin tapauksessa I_R on nolla. Ruokohelven

ollessa kysymyksessä rajataan pois vaihtoehtoinen pellon käyttö. Periaatteessa lähtökohtia voi olla useita, esimerkiksi viljelty tai viljelemätön pelto.

Kasvihuonevaikutuksen laskemisessa huomioidaan päästöt ja nielut kultakin tarkasteluvuodelta sekä polttoaineiden hyödyntämisketjusta että referenssitilanteen ketjusta, joiden erotuksesta saadaan nettovaikutus kultakin vuodelta. Kasvihuonevaikutuksen oletetaan olevan lineaarinen funktio kunkin tarkasteluvuoden nettopäästöistä, koska tarkastellut päästöt ovat vain pieni osa globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä ja -nieluista.

4. Tarkasteltavat polttoaineketjut

Tutkimuksessa tarkasteltiin eri liikennepolttoaineketjujen ilmastovaikutusta. Ketjut on listattu taulukossa 1. Ensimmäisenä on fossiilinen diesel (Ketju 1). Metsätähde-F-T-diesel (Ketju 2) lasketaan ilmastovaikutuksen näkökulmasta, jossa arvioidaan ihmisen aiheuttamaa muutosta. Vertailutilanteena on, että metsätähteet jäävät metsään ja hajotessaan aiheuttavat CO₂-päästöjä. Ruokohelpipohjainen F-T-diesel toimii vertailussa esimerkkinä peltobiomassapohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutuksesta (Ketju 3). Laskemalla fossiilisen dieselin, metsätähdepohjaisen ja ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutus säteilypakotteella samoilla arvoilla kuin Mäkinen et al. (2006) tutkimuksessa luodaan vertailtavuus em. tutkimukseen,² jossa kasvihuonevaikutusta oli arvioitu GWP-kertoimilla.

Turvepohjaisen F-T-dieselin tarkastelussa käytetään useita eri elinkaaren rajauksia (ks. kuva 2). Ketjuissa 4 ja 9 huomioidaan ainoastaan suolta tuotettu turve, ja alueen jälki-käytössä eli metsityksessä huomioidaan vain metsään sitoutuva keskimääräinen pitkän aikavälin hiilivarasto. Ketju 4 kuvaa pääosin nykyisen energiaturpeen tuotannon tilannetta. Ketju 5 kuvaa turvemaan hyödyntämistä turvetuotantoon, jolloin ensin tuotettu turve jalostetaan F-T-dieseliksi ja tämän jälkeen turvetuotantoalue ennallistetaan eli pyritään soistamaan ja muuttamaan toimivaksi suoekosysteemiksi.

Ketjuissa 6, 7, 8, 10 ja 11 käytetään turvemaata kokonaisvaltaisesti F-T-dieselin tuotantoon. Ketjuissa 7, 8, 10 ja 11 huomioidaan turvemaalta tuotettu turve ja sen jalostus ja hyödyntäminen F-T-dieselinä sekä myös turvemaan metsityksen tuottaman puubiomassan jalostus ja hyödyntäminen F-T-dieselinä. Ketjussa 6 huomioidaan samoin ensin turvetuotantoalueen hyödyntäminen F-T-dieselin tuotantoon, jonka jälkeen turvetuotantoalueen pohjalla viljellään ruokohelpeä. Tuotettu ruokohelppi jalostetaan edelleen F-T-dieseliksi. Ketjussa 11 on arvioitu kasvihuonevaikutus, kun tuotantoa ei ole integroitu esim. metsäteollisuudessa toimivan laitoksen yhteyteen vaan se toimii itsenäisesti (ns. stand-alone-laitos).

² Huom. Vertailussa Mäkinen et al. (2006) tutkimukseen tulee kuitenkin huomioida sähköntuotannon päästökertoimien vaikutus. Mäkinen et al. käyttivät sähköntuotannon päästöille oletusarvoa 250 g CO₂-ekv./kWh_e (keskiarvo arvioidun Suomen nettosähköenergian päästöistä 200–300 g CO₂-ekv./kWh_e), kun tässä tarkastelussa käytetään oletuksena marginaalisähköön päästökerrointa 900 g CO₂-ekv./kWh_e (ks. kohta 5.1). Herkkyystarkastelussa on oletettu, että F-T-dieselin tuotannossa käytetty sähkö on nollapäästöistä, jolloin sähkön vaikutus kokonaisvaikutuksen on selvästi havaittavissa.

Taulukko 1. Tarkastellut liikennepolttoaineketjut ja niiden elinkaaren eri vaiheet.

Ketju	Energiavara	Energian tuotanto ja hyödyntäminen polttoaineeksi	Jälkikäsittely	Jälkikäsittelyn hyödyntäminen	Vertailutilanne
1	Raakaöljy	Jalostus diesel-polttoaineeksi	-	-	-
2	Hakkuu-tähteet	Jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	-	-	Hakkuu-tähteiden hajoaminen
3	Ruokohelpi	Jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	-	-	-
4	Metsäojitettu suo	Jyrsinturvetuotanto ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Metsitys	-	Metsäojitetun suon normaali kehitys
5	Metsäojitettu suo	Uusi turvetuotantomenetelmä (biomassakuivuri) ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Soistaminen	-	Metsäojitetun suon normaali kehitys
6	Metsäojitettu suo	Jyrsinturvetuotanto ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Ruokohelven viljely	Ruokohelpi prosessoidaan F-T-dieseliksi	Metsäojitetun suon normaali kehitys
7	Metsäojitettu suo	Jyrsinturvetuotanto ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Metsitys	Puubiomassa prosessoidaan F-T-dieseliksi	Metsäojitetun suon normaali kehitys
8	Metsäojitettu suo	Uusi turvetuotantomenetelmä (biomassakuivuri) ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Metsitys	Puubiomassa prosessoidaan F-T-dieseliksi	Metsäojitetun suon normaali kehitys
9	Suopelto	Jyrsinturvetuotanto ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Metsitys	-	Suopellon normaali kehitys
10	Suopelto	Uusi turvetuotantomenetelmä (biomassakuivuri) ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi	Metsitys	Puubiomassa prosessoidaan F-T-dieseliksi	Suopellon normaali kehitys
11	Metsäojitettu suo	Uusi turvetuotantomenetelmä (biomassakuivuri) ja jalostus F-T-diesel-polttoaineeksi sekä Stand-alone-tuotanto	Metsitys	Puubiomassa prosessoidaan F-T-dieseliksi	Metsäojitetun suon normaali kehitys

5. Lähtöarvot ja oletukset

Tässä luvussa esitellään kunkin tarkastellun polttoaineketjun kasvihuonevaikutuksen laskennan lähtöarvot. Tarkasteluajanjaksot olivat 100 ja 300 vuotta. Laskennan mahdollistamiseksi tehtiin seuraavia oletuksia. Laskennassa kussakin ketjussa tuotetaan ja hyödynnetään 1 GJ:n (0,28 TWh) edestä polttoainetta. Laskennassa tulee huomioida, että osa päästökertoimista on esitetty lopputuotteen ja osa tuotantovaran energiasisältöä kohden. Turvetuotannossa turpeen energiasisältö hehtaarilla on 33,840 TJ/ha (9400 MWh/ha) (Leinonen & Hillebrand 2000). Jos alueella tuotetaan jälkikäytössä puubiomassaa, jota hyödynnetään myös liikennepolttoaineiden tuotannossa, tarvitaan 1 GJ:n tuottamiseksi pienempi tuotantoala. Metsityksen vuosittainen tuottavuus on n. 51 200 MJ/ha (Kirkinen et al. 2007a, Aro & Kaunisto 2003). Ruokohelven tuottavuus on noin 100 800 MJ/ha (28 MWh/ha) (Mäkinen et al. 2006).

Laskelmissa oletettiin, että biomassapohjaisen F-T-dieselin tuotanto on integroitu esim. metsäteollisuuden laitoksen yhteyteen tai laitos sijoitetaan erilleen muista laitoksista (ns. stand-alone). Taseet perustuvat VTT:n tutkimushankkeissa tehtyyn työhön (Saviharju & McKeough 2007, McKeough & Kurkela 2007). F-T-dieselin tuotannon integrointi esim. metsäteollisuuden laitoksen yhteyteen mahdollistaa F-T-dieselin tuotannossa muodostuvan sivutuote-energian tehokkaan hyödyntämisen ja siten korkean kokonaishyötysuhteen. Integrointi on mahdollista tehdä joustavasti vaihdellen biomassasyötteen, ostosähkön ja tuotetun F-T-dieselin määrää. Tässä työssä arvioitiin integroitu konsepti, jossa biomassasyötteen määrä on minimoitu, jolloin ostosähkön kulutus on suhteellisen suuri. Lähtöoletuksena oli, että raaka-aineen määrä on tuotantoa rajoittava tekijä. Integroidussa tuotannossa on kuitenkin mahdollista vähentää ostosähkön tarvetta, jolloin tuotetun F-T-dieselin määrä pienenee tai raaka-aineen tarve kasvaa.

Stand-alone-tehtaassa sivutuote-energiasta valmistetaan sähköä, jolloin ostosähkön tarve on pieni. Kun dieseliä tuotetaan integroidusti konseptissa, jossa biomassasyötteen määrä on minimoitu, on tehtaan sähkön kulutus huomattavasti stand-alone-tehdasta korkeampi, mutta taas raaka-aineen tarve on stand-alone-tehtaassa paljon suurempi kuin integroidussa laitoksessa. Raaka-aineen tarve arvioiduissa prosesseissa esitetään raaka-aineiden kohdalla.

5.1 Sähkö

Kun biomassapohjaisen F-T-dieselin tuotanto on integroitu esim. metsäteollisuuden laitoksen yhteyteen, on mahdollista joustavasti vaihdella biomassasyötteen, ostosähkön ja tuotetun F-T-dieselin määrää. F-T-dieselin tuotannon yhteydessä voidaan aina tehokkaasti

tuottaa lisäsähköä esimerkiksi johtamalla osa synteesikaasusta F-T-reaktorin ohi kaasuturbiiniin. Kun ostosähkön määrää vähennetään, kasvaa tarvittavan raaka-aineen määrä.

Työssä arvioidussa metsäteollisuuden integroidussa F-T-dieselin tuotantoprosessissa on biomassasyötteen määrä minimoitu, sillä saatavilla olevan raaka-aineen määrän ja turpeen suhteellisen suuren kasvihuonevaikutuksen on oletettu olevan rajoittavina tekijöinä. Prosessissa tarvittava apuenergia on lähinnä sähköä, jota tarvitaan suhteellisen paljon. Siitä seuraa, että tälle prosessivaihtoehdolle ostosähkön tuotannossa syntyvillä päästöillä on merkittävä vaikutus F-T-dieselin tuotantoprosessin kokonaiskasvihuonekaasutaseeseen.

Sähkön tuotannossa syntyvien päästöjen arviointi ei ole yksioikoisen selvää, sillä päästöihin vaikuttaa moni tekijä. Koska kyse on uudesta sähkön kulutuskohteesta, lisää tämä sähkön kokonaiskysyntää ja vaikutus syntyy siis tuotannon marginaalipäähän. Jos sähkö ostetaan valtakunnan verkosta, voidaan prosessissa kulutetun sähkön ajatella vastaavan marginaalituotantoa, jonka määrittäminen ei kuitenkaan ole yksinkertaista. Marginaalituotanto vaihtelee vuosikulutuksen ja muun muassa saatavilla olevan vesivoiman vuoksi merkittävästi. Edelleen voidaan ajatella, että mikäli tietyssä prosessissa kulutetun sähkön voidaan perustellusti katsoa lisäävän vähäpäästöisen sähkön osuutta tuotannossa, voidaan prosessissa kulutetun sähkön ajatella olevan myös vähäpäästöistä. Toisaalta tällainen sähkö voitaisiin myydä valtakunnan verkkoon korvaamaan marginaalisähköä, mikäli sitä ei käytettäisi kyseisen prosessin tarvitseman sähkön tuottamiseen. Näin ollen prosessissa kulutettavan sähkön voidaan ajatella olevan marginaalisähköstä poikkeavaa vähäpäästöistä tuotantoa vain, jos kyseistä tuotantoa ei olisi ilman prosessin toteuttamista syntynyt. Tällaisen tilanteen todentaminen ilman asiaankuuluvaa lainsäädäntöä voi olla hyvin hankalaa.

VTT:llä on simuloitu pohjoismaisten sähkömarkkinoiden marginaalituotantoa vuosille 2004 ja 2005. Kun myös polttoaineiden tuotannossa ja kuljetuksissa syntyvät välilliset päästöt epävarmuuksineen huomioitiin, saatiin marginaalituotannon päästöiksi 990–1255 g CO₂-ekv./kWh_e vuodelle 2004 ja 414–529 g CO₂-ekv./kWh_e vuodelle 2005. Pohjoismaiden ulkopuolelta tuotavaa sähköä ei ole huomioitu. Marginaalista merkittävä osa on vuonna 2004 kivihiililauhdetta ja vuonna 2005 puolestaan kaasulauhdetta tai -CHP:tä. Jos oletetaan, että tuotantorakenne pysyisi muuttumattomana ja käytetään vuoden 2004 ja 2005 marginaalituotannolle vuodelle 2020 arvioituja uusien laitosten hyötysuhteita, saadaan marginaalisähkön päästöiksi 672–825 g CO₂-ekv./kWh_e vuodelle 2004 ja 375–475 g CO₂-ekv./kWh_e vuodelle 2005. Tämä kertoo sen, että hyötysuhteissa tulevaisuudessa tapahtuvat parannukset voivat jo itsessään pienentää marginaalisähkön päästöjä, erityisesti huonojen vesivuosien osalta.

Tässä työssä marginaalisähkön päästökertoimeksi on valittu VTT:llä tehtyjen simulointien perusteella 900 g CO₂-ekv./kWh_e, joka kuvaa riittävällä tarkkuudella vuosien 2004 ja 2005 keskimääräisen marginaalituotannon päästöä ja myös kivihiililauhteen päästöjä (taulukko 2). Koska marginaalisähkö voi, erityisesti tulevaisuudessa, olla lähes mitä vain vähäpäästöisen ja kivihiililauhteen välillä, valittiin toiseksi ääripääksi nollapäästöinen sähköntuotanto. Myöhemmin esitellyissä kohdissa laskennan lähtöarvoista tulee huomioida, että jos erikseen ei ole mainittu nollapäästöisen sähkön aiheuttamia päästöjä (joissa on saatettu huomioida myös muita päästöjä), tulee laskennassa nollapäästöiselle sähkölle käyttää arvoa nolla kaikkien kasvihuonekaasujen suhteen. Aiemmassa tutkimuksessa Mäkinen et al. (2006) liikennepolttoaineiden ja niiden kasvihuonekaasutaseiden laskennassa käytettiin sähkön päästöarvona 250 g CO₂-ekv./kWh_e.

Taulukko 2. Marginaalisähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöt esitettynä g/kWh_e sekä g/MJ_e.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -ekv.
Marginaalisähkö	880 g/kWh _e	0,23 g/kWh _e	0,05 g/kWh _e	900 g/kWh _e
	244 g/MJ _e	0,06 g/MJ _e	0,01 g/MJ _e	250 g/MJ _e

5.2 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

F-T-dieselin valmistusprosessissa voidaan ottaa talteen ns. prosessipäästöjä eli prosessissa tapahtuvia hiilen virran häviöitä. F-T-prosessissa erotetaan prosessiteknisistä syistä hiilidioksidia, joka tarvitsee vain puristaa kasaan. Tässä tutkimuksessa oletetaan, että F-T-prosessissa tapahtuvista prosessipäästöistä saadaan talteen n. 70 %. Puristuksessa tarvitaan sähköä tuotettua F-T-dieseliä kohden n. $2,26 \cdot 10^{-3}$ kWh/MJ_{F-T-diesel}. Taulukossa 3 on esitelty hiilidioksidin puristuksessa tarvittavan sähkön tuotannossa syntyvät päästöt, kun sähkön oletetaan olevan pohjoismaisilta sähkömarkkinoilta ostettavaa marginaalisähköä. Hiilidioksidien kuljetuksen ja loppuvarastoinnin päästöjä ei ole tässä yhteydessä arvioitu. Taloudellisista syistä kuljetuksen tulisi todennäköisesti tapahtua yhdessä voimalaitoksista talteenotettavan hiilidioksidin kanssa. Kuljetuksen ja loppusijoituksen energiantarve ja niistä syntyvät päästöt ovat oletettavasti vähäiset kokonaisuuteen nähden.

Taulukko 3. CCS-prosessin sähköntarve ja sen aiheuttamat päästöt.

	CO ₂ (g/MJ _{F-T-diesel})	CH ₄ (g/MJ _{F-T-diesel})	N ₂ O (g/MJ _{F-T-diesel})
Marginaalisähkö	1,98	0,0005	0,0001

5.3 Fossiilinen diesel

Fossiilisen dieselin kasvihuonevaikutuksen laskemisessa käytettiin Mäkisen et al. (2006) tutkimuksessa käytetyn Edwardsin et al. (2003) raportin arvoja. Dieselöljy on raakaöljyjälöste, joka puhdistetaan öljynjalostamoissa jakelua ja käyttöä varten. Lähtöarvot kasvihuonekaasupäästöille on laskettu vuoden 2010 arvioidun tilanteen mukaan siten, että vain rajoitettu osuus perinteisistä jalostamotuotteista on arvioitu korvattavan biopohjaisilla polttoaineilla. Polttoaineiden kuljetuksen päästöt on laskettu huomioimalla erilaisten kuljetusosuuksien tyypilliset osuudet Euroopassa. Fossiilisen dieselin tuotannon ja käytön aiheuttaman kasvihuonevaikutuksen laskemisessa käytetyt arvot on lueteltu taulukossa 4.

Taulukko 4. Fossiilisen dieselin elinkaaren eri vaiheissa tapahtuvat päästöt (Mäkinen et al. 2006).

Elinkaaren vaiheet	CO ₂ (g/MJ)	CH ₄ (g/MJ)	N ₂ O (g/MJ)
Raakaöljyn tuotanto	3,33	0	0
Raakaöljyn kuljetus	0,81	0	0
Raakaöljyn jalostus	8,60	0	0
Diesel-öljyn kuljetus	0,23	0,0001	0
Diesel-öljyn varastointi	0,10	0,0002	0
Diesel-öljyn jakelu ja annostelu	0,72	0,001	0
Diesel-öljyn käyttö moottorissa	73,3	¹	¹

¹ Päästöt riippuvat siitä, minkälaisessa moottorissa ja olosuhteissa polttoaine poltetaan. Vertailtaessa polttoaineita samassa kulutuskohteessa keskenään ei polton metaani- ja typpioksiduulipäästöillä ole käytännössä eroa vertailtavien polttoaineiden välillä.

5.4 Hakkuutähdepohjainen F-T-diesel

Hakkuutähdepohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutuksen arvioimisessa huomioitiin sekä tuotannon ja käytön aiheuttamat päästöt että referenssitilanne. Referenssitilanteella tarkoitetaan tässä työssä sitä, että metsätähteet hajoavat metsään aiheuttaen päästöjä, jos niitä ei sieltä kerätä ja hyödynnetä. Hakkuutähdepohjaisen F-T-dieselin kasvihuonekaasupäästöjä on aiemmin selvitelty julkaisussa Mäkinen et al. (2006). Tässä työssä hakkuutähdepohjaisen F-T-dieselin tuotanto- ja hyödyntämisketjua tarkasteltiin em. tutkimuksessa tarkasteltujen arvojen perusteella käyttäen kasvihuonevaikutuksen arviointiin säteilypakotetta.

5.4.1 Hakkuutähde-F-T-dieselin tuotanto ja käyttö

Hakkuutähde-F-T-dieselin tuotanto (hakkuutähteiden korjuu, kuljetukset, haketus) aiheuttaa päästöjä mm. työkoneiden käytön kautta. F-T-dieselprosessissa tarvitaan merkittävästi

sähköä, mikä aiheuttaa myös päästöjä riippuen siitä, miten kyseinen sähkö on tuotettu. Prosessissa aiheutuu päästöjä jalostuksessa, varastoisemisessa ja jakelussa. Taulukossa 5 on esitetty hakkuutähde-F-T-dieselin tuotannosta ja hyödyntämisestä aiheutuvat päästöarvot. Arvot on esitetty jalostuksen kohdalla erikseen integraatti- ja stand-alone-laitokselle. Raaka-aineen tarve on metsätähdepohjaisen F-T-dieselin integroidussa tuotannossa 2 % suurempi verrattuna tuotettuun polttoaineeseen, kun taas stand-alone-tuotannossa raaka-aineen tarve on 69 % suurempi. Myös marginaalisähkön sekä nollopäästöisen sähkön käyttö tuotannossa, joka vaikuttaa merkittävimmin jalostusvaiheen päästöihin, on eroteltu taulukossa. Tarkasteluun valittu integroitu tuotantotapa tarvitsee huomattavasti enemmän ostosähköä kuin stand-alone-tuotantomenetelmä.

Taulukko 5. Hakkuutähde-F-T-dieselin tuotannon hyödyntäminen eri vaiheiden päästöarvot.

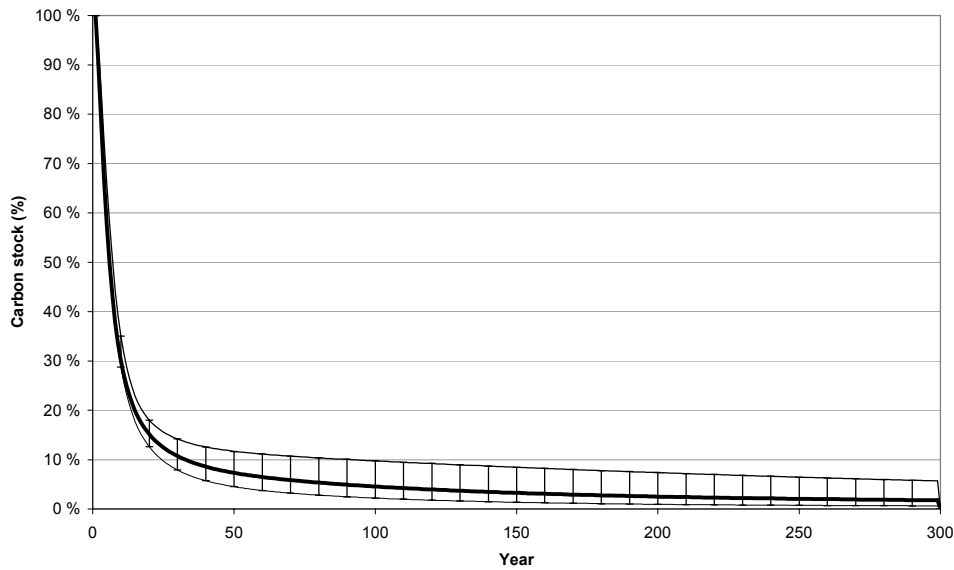
Hakkuutähteiden hyödyntämisen eri vaiheet	CO ₂ (g/MJ _{F-T-diesel})	CH ₄ (g/MJ _{F-T-diesel})	N ₂ O (g/MJ _{F-T-diesel})
Paalaus, metsäkuljetus, haketus, kaukokuljetus, siirrot (diesel-öljyn kulutuksesta aiheutuvat päästöt)	1,84	0,0001	0,0007
Murskaus (marginaalisähkö)	0,21	5,6*10 ⁻⁵	1,2*10 ⁻⁵
Jalostus (integraatti, marginaalisähkö)	48,07	0,0134	0,0027
Jalostus (integraatti, nollasähkö)	0,0758	0,0007	1,73*10 ⁻⁶
Jalostus (stand-alone, marginaalisähkö)	1,597	0,0012	8,77*10 ⁻⁶
Jalostus (stand-alone, nollasähkö)	0,0798	0,0008	1,82*10 ⁻⁶
Varastointi ja jakelu	0,82	0,0012	0
Prosessipäästöt (integraatti) ¹	39,7	-	-
Loppukäytön suorat päästöt	70,7	²	²

¹ CCS-prosessissa prosessipäästöistä saadaan 70 % talteen. CCS-prosessi tarvitsee myös sähköä. Ks. kohta 5.2.

² Päästöt riippuvat siitä, minkälaisessa moottorissa ja olosuhteissa polttoaine poltetaan. Vertailtaessa polttoaineita samassa kulutuskohteessa keskenään ei polton metaani- ja typpioksiduulipäästöillä ole käytännössä eroa vertailtavien polttoaineiden välillä.

5.4.2 Vertailutilanne: hakkuutähteiden hajoaminen

Metsätähde-F-T-dieselin kasvihuonevaikutuksen laskennassa vähennetään dieselin tuotannosta ja hyödyntämisestä aiheutuneesta vaikutuksesta referenssitilanteen päästöt, siis jos hakkuutähteitä ei korjattaisi, jäisivät ne metsään ja hajoaisivat aiheuttaen päästöjä. Hakkuutähteiden hajoaminen on laskettu Yasso-mallilla (Liski et al. 2005). Kuva 6 esittää hakkuutähteiden hajoamista. Kuvassa on esitetty jäljellä olevan hiilen varasto ajan funktiona. Hakkuutähteet hajoavat hyvin nopeasti ensimmäisten 20 vuoden aikana, mutta tämän jälkeen jäljelle jäävä hiilen varasto hajoaa hyvin hitaasti, ja jopa 300 vuoden jälkeenkin on maassa vielä materiaalia, joka ei ole hajonnut.



Kuva 6. Yasso-mallilla laskettu hakkuutähteiden hajoaminen. Kuva esittää jäljellä olevaa hiilen varastoa ajan funktiona (Kirkinen et al., toimitettu julkaistavaksi).

5.5 Ruokohelpipohjainen F-T-diesel

Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutuksessa huomioidaan ruokohelven viljelystä (mukaan lukien lannoitteiden ja kalkin valmistus ja kuljetus), korjaamisesta, paalauksesta, kuljetuksista, käsittelystä (paalien murskaus ja silppuaminen) ja jalostuksesta aiheutuneet päästöt (taulukko 6). Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin laskelmissa oletettiin, että hyödyntämisestä (loppukäytöstä) sekä prosessista ei tule päästöjä, sillä ruokohelpeen sitoutunut hiili on nopeakiertoista (1 vuosi). Jos oletetaan, että ruokohelpi-F-T-dieselin tuotantoon on yhdistetty CCS, saadaan tällöin osa hiilestä talteen.

Taulukko 6. Ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin eri tuotanto- ja hyödyntämisvaiheiden päästöarvot.

Ruokohelven hyödyntämisen eri vaiheet	CO ₂ (g/MJ _{F-T-diesel})	CH ₄ (g/MJ _{F-T-diesel})	N ₂ O (g/MJ _{F-T-diesel})
Viljelyn ja niiton koneiden käyttöenergia	0,55	3,13*10 ⁻⁵	0,0002
Paalaus, paalien murskaus, silppuaminen	0,35	1,97*10 ⁻⁵	0,0001
Kaukokuljetus	1,53	8,65*10 ⁻⁵	0,000
Kalkin valmistus ja kuljetus	0,30	0	0
Lannoitteiden valmistus ja kuljetus	1,51	0,0005	0,006
Jalostus (marginaalisähkö)	49,92	0,014	0,003
Jalostus (nollasähkö)	0,10	0,00097	2,32*10 ⁻⁶
F-T-dieselin varastointi ja jakelu	0,82	0,0012	0
Maaperän CO ₂ -päästö kalkituksesta	3,21	0	0
Maaperän N ₂ O-päästö lannoituksesta	0	0	0,015
CCS ruokohelpi-F-T-dieselin tuotannossa ¹	-27,8	0	0

¹ CCS-prosessissa prosessipäästöistä saadaan 70 % talteen. CCS-prosessi tarvitsee myös sähköä. Ks. kohta 5.2.

5.6 Turvepohjainen F-T-diesel

Turvepohjaisissa F-T-dieselin tuotanto- ja hyödyntämisketjuissa oletettiin laskennan helpottamiseksi, että turvetuotanto tapahtuu yhdessä vuodessa. Turvetta tuotetaan joko metsäojitetuilta soilta tai viljelykäytössä olevilta suopelloilta. Nämä molemmat alat ovat kasvihuonekaasujen lähteitä (kohta 5.6.1). Turpeen tuotantotapoja on kaksi: nykyinen jyrshinturvetuotantomenetelmä ja vähäpäästöisempi uusi tuotantomenetelmä (biomassakuivuri) (kohta 5.6.2). Turpeen jalostaminen F-T-dieseliksi ja turve-F-T-dieselin loppukäyttö aiheuttavat päästöjä mm. sähkön kulutuksen kautta (kohta 5.6.3). Turvedieselin kasvihuonevaikutuksen laskennassa huomioidaan myös turvetuotantoon hyödynnettyjen alueiden jälkikäyttö (kohta 5.6.4).

5.6.1 Metsäojitettu suo ja suopelto

Metsäojitettuja soita on Suomessa n. 5,6 miljoonaa hehtaaria, joka vastaa n. 75 % koko turvetuotantoalueista. Metsäojitettu suo on maltillinen päästölähde hiilidioksidin ja typpioksiduulin suhteen. Kun suo on aikoinaan ojitettu ja näin laskettu vedenpintaa, on turve päässyt tekemisiin hapen kanssa ja näin alkanut hajota. Maatalouskäyttöön ojitetuista suoalueista eli suopeltoja on Suomessa n. 240 000 hehtaaria (Virtanen et al. 2003). Suopelto on merkittävä hiilidioksidin ja typpioksiduulin lähde ja vaatimaton metaaninielu. Turpeen hajoaminen näiltä alueilta on hyvin nopeaa aiheuttaen merkittävät kasvihuonekaasupäästöt. Tämän vuoksi suopeltojen hyödyntäminen olisi suotavaa mutta käytännössä hyvin vähäistä. Taulukossa 7 on esitetty metsäojitetun ja suopeltojen keskimääräiset päästöarvot.

Taulukko 7. Työssä tarkasteltujen turvemaiden keskimääräiset päästöarvot (Kirkinen et al. 2007a, 2007b).

	CO ₂ (g/m ² /a)	CH ₄ (g/m ² /a)	N ₂ O (g/m ² /a)
Metsäojitettu suo	224	0	0,1
Suopelto	1760	-0,147	1,297

5.6.2 Turpeen tuotanto

Turve hajoaa turvetuotantokentällä sekä aumoissa aiheuttaen päästöjä. Turpeen tuotanto aiheuttaa päästöjä myös työkoneiden kautta. Tarkastelussa on kaksi eri tuotantomenetelmää: tällä hetkellä eniten käytössä oleva jyrshinturvemenetelmä sekä uusi turvetuotantomenetelmä (biomassakuivuri). Näiden tuotantomenetelmien aiheuttamat päästöarvot esitetään taulukossa 8. Päästöluvut sisältävät työkoneiden käytöstä johtuvat päästöt, aumojen ja tuotantoalueen päästöt tai biomassakuivurin käytöstä johtuvat päästöt. Jyrshinturvemenetelmässä turvetta jyrsitään turvemaan pinnasta (0,5–2 cm kerros) ja jäte-

tään kuivumaan turvekentälle muutamaksi päiväksi riippuen sääolosuhteista. Turvetta karhitaan välillä kuivumisen nopeuttamiseksi. Tämän jälkeen turve kerätään. Jyrsinturvemenetelmässä koko turvemaata on tuotannon alaisena.

Uutta turvetuotantomenetelmää ovat kehittäneet Vapo Oy ja VTT. Uudessa menetelmässä vain pieni osa tuotantoalueesta on kerrallaan käytössä. Tuotannossa oleva alue tyhjennetään kerralla kokonaan eli alueen pohjaan asti. Turve pumpataan asfaltoidulle kuivatuskentälle, jossa se kuivuu nopeammin ja tehokkaammin aiheuttaen vähemmän päästöjä kuin jyrsinturvemenetelmä. Uuden menetelmän etuja ovat myös pölypäästöjen väheneminen ja mahdollisuus ennallistaa hyödynnetty alue heti tuotannon jälkeen.

Tämänhetkisellä jyrsinturpeen tuotantomenetelmällä on mahdotonta saada kaikkea turvetta pois turvemaasta mm. epätasaisen pohjan takia. Tämän vuoksi alueelle jää jäännösturvetta, joka hiljalleen hajoaa aiheuttaen päästöjä (jäännösturvetta on arvioitu jäävän n. 20 cm, joka hajoaa eksponentiaalisesti eli hajoaminen on nopeaa alussa ja hidastuu ajan myötä). Uudella tuotantomenetelmällä ei ole tätä ongelmaa, sillä turve saadaan pumpattua hyödynnettävältä alueelta pois suhteellisen tarkasti noudattaen pinnan muotoja.

Taulukko 8. Turpeen tuotannon päästöt perinteisellä jyrsinturvetuotannolla sekä uudella turvetuotantomenetelmällä (biomassakuivuri).

	CO ₂ (g/MJ)	CH ₄ (g/MJ)	N ₂ O (g/MJ)
Jyrsinturvetuotanto	9,32	0,0046	0,000025
Uusi turpeen tuotantomenetelmä (biomassakuivuri)	2,45	0,0007	0,00027

5.6.3 Turpeen jalostus F-T-dieseliksi sekä turve-F-T-dieselin loppukäyttö

Kun turve on tuotettu, se varastoidaan ja kuljetetaan jalostamoille, jossa se prosessoidaan F-T-dieseliksi. Prosessoinnissa jalostus aiheuttaa merkittävästi päästöjä etenkin, jos käytettävä sähkö oletetaan marginaalisähköksi. Tarkastelussa on huomioitu myös tuotantovaihtoehdot (integroitu ja stand-alone tuotanto) sekä eri tuotannossa tarvittavat raaka-ainemäärät. Turve-F-T-dieselin integroidussa tuotannossa tarvitaan 7 % enemmän turvetta tuotettua F-T-dieseliksi kohden. Stand-alone-tuotannossa raaka-aineen tarve on jopa 78 % suurempi tuotettua F-T-dieseliksi kohden. Ostosähkön kulutus taas on integroidussa F-T-dieselin tuotantokonseptissa huomattavasti suurempi kuin stand-alone-tuotannossa. Myös sähkön päästökertoimen vaikutus (marginaalisähkö ja nollapäästöinen sähkö) on mukana tarkastelussa (taulukko 9).

Taulukko 9. Turve-F-T-dieselin jalostuksen ja käytön päästöarvot.

Turpeen hyödyntämisen eri vaiheet	CO ₂ (g/MJ _{F-T-diesel})	CH ₄ (g/MJ _{F-T-diesel})	N ₂ O (g/MJ _{F-T-diesel})
Jalostus (integraatti, marginaalisähkö)	50,46	0,014	0,003
Jalostus (integraatti, nollasähkö)	0,08	0,00076	2,0*10 ⁻⁶
Jalostus (stand-alone, marginaalisähkö)	1,786	0,00121	9,8*10 ⁻⁵
Jalostus (stand-alone, nollasähkö)	0,08	0,00076	2*10 ⁻⁶
Varastointi ja jakelu	0,82	0,0012	0
Prosessipäästöt (integraatti) ¹	42,7	-	-
Prosessipäästöt (stand-alone) ¹	117,9	-	-
Loppukäytön suorat päästöt	70,7	²	²

¹ CCS-prosessissa prosessipäästöistä saadaan 70 % talteen. CCS-prosessi tarvitsee myös sähköä. Ks. kohta 5.2.

² Päästöt riippuvat siitä, minkälaisessa moottorissa ja olosuhteissa polttoaine poltetaan. Vertailtaessa polttoaineita samassa kulutuskohteessa keskenään ei polton metaani- ja typpioksiduulipäästöillä ole käytännössä eroa vertailtavien polttoaineiden välillä.

5.6.4 Jälkikäsitteilyvaihtoehdot

Työssä tarkasteltiin jälkikäsitteilyvaihtoehtoina metsitystä, ruukohelven viljelyä ja sois-tamista. Työssä on kaksi eri rajausta turvetuotantoalueen pohjan hyödyntämisessä, kun jälkikäyttönä on metsitys. Turvemaa voidaan hyödyntää dieselin valmistukseen koko-naisvaltaisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että elinkaari rajataan koskemaan myös turvetuo-tantoalueen jälkikäytön hyödyntämistä. Kun turvetuotantoalueen pohja metsitetään, hyödynnetään tuotettu biomassa kokonaisuudessaan edelleen F-T-dieselin tuotantoon. Toisena tapauksena on, että kasvanut metsä hyödynnetään muun teollisuuden tarpeisiin ja tässä rajauksessa huomioidaan vain pitkällä aikavälillä metsään sitoutunut hiili.

Jos metsän kasvusta saatu puubiomassa hyödynnetään edelleen F-T-dieseliksi, tulee täl-löin huomioida myös F-T-dieselin tuotannon ja jalostuksen päästöt. Metsityksessä saata-vasta puubiomassasta tuotetun F-T-dieselin tuotannossa on oletettu laskujen mahdolla-stamiseksi, että puubiomassa on nollapäästöistä (ei prosessi- eikä loppukäytön päästöjä). Metsityksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt sekä -nielut on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Metsityksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ja -nielut.

Metsitys	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Hiilen sitoutuminen kasvavaan biomas-saan ¹	-448 (g/m ² /a)	-	-
Hiilen sitoutuminen maanpäälliseen ¹ biomassaan	-147 (g/m ² /a)	-	-
Maanalaisen hiilen kertyminen	-15 (g/m ² /a)	-	-
Metsätähde-F-T-dieselin tuotannon ja jalostuksen päästöt (marginaalisähkö)	50,95 (g/MJ)	0,015	0,003
Metsätähde-F-T-dieselin tuotannon ja jalostuksen päästöt (nollasähkö)	2,74 (g/MJ)	0,002	0,001
Metsätähde-F-T-dieselin tuotannon ja jalostuksen päästöt (stand-alone)	4,5 (g/MJ)	0,003	0,001

¹ Pitkällä aikavälillä (100 ja 300 vuotta) on arvioitu, että metsään sitoutuva hiili saavuttaa keskiarvonsa n. 45 vuodessa.

Ruokohelven viljelyn, tuotannon ja jalostamisen kasvihuonekaasupäästöt esitetään taulukossa 11. Tarkemmin ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kasvihuonekaasupäästöjä on tarkasteltu kohdassa 5.5.

Taulukko 11. Ruokohelpi-F-T-dieselin tuotannon kasvihuonekaasuvirrat.

	CO ₂ (g/MJ)	CH ₄ (g/MJ)	N ₂ O (g/MJ)
Ruokohelven tuotanto	58,19	0,016	0,02

Turvetuotantoalueen pohjan ennallistaminen toimivaksi ekosysteemiksi on yksi jälleenkäsittelyvaihtoehto. Soistaminen sitoo pitkällä aikavälillä hiiltä, vaikka vuosittaisia vaihteluja hiilivirroissa saattaa olla (joinakin vuosina suo saattaa olla hiilen nettopäästäjä ja toisina vuosina nettositoja) johtuen mm. sääolosuhteista. Soistaminen kuitenkin aiheuttaa myös metaanin päästöjä (käyttäytyy kuten luonnontilainen suo), joiden vuoksi soistaminen ei ole niin edullinen vaihtoehto ilmastonäkökulmasta kuin puu- tai ruokohelpibiomassan kasvattaminen turvetuotantoalueen pohjalla (taulukko 12).

Taulukko 12. Soistamisen päästökertoimet (Kirkinen et al. 2007a ja 2007b).

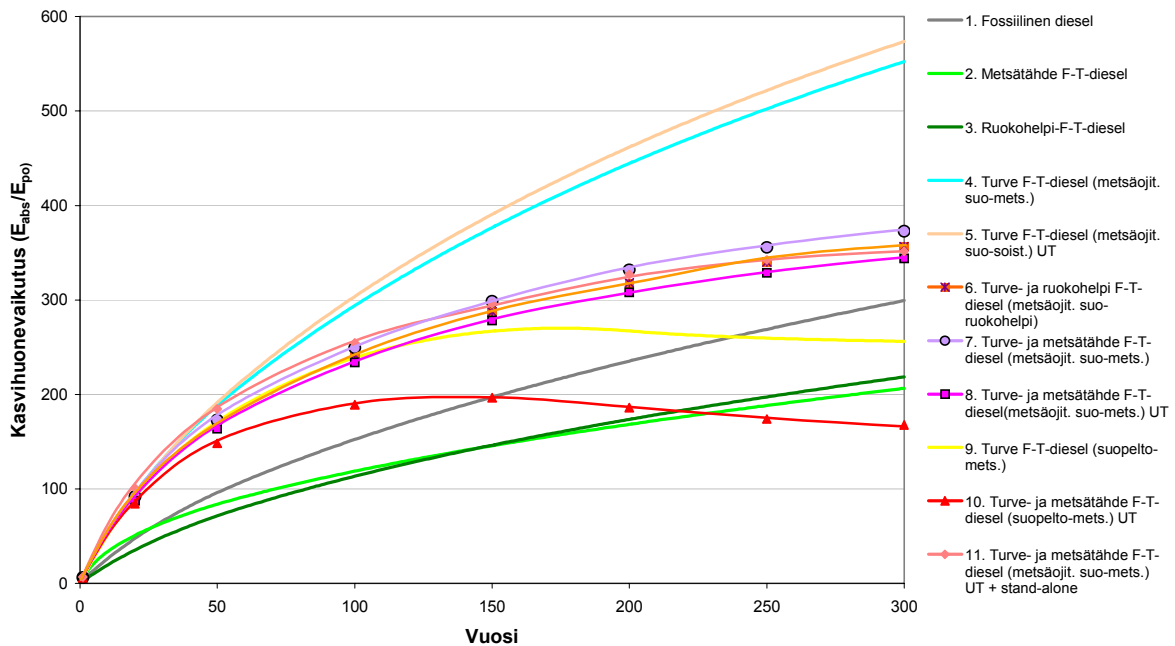
	CO ₂ (g/m ² /a)	CH ₄ (g/m ² /a)	N ₂ O (g/m ² /a)
Soistaminen	-121,6	22,66	0

6. Tulokset

Eri liikennepolttoaineiden kumulatiivinen kasvihuonevaikutus ajan funktiona esitetään kuvassa 7. Kuvassa esitetyt tulokset on laskettu oletuksella, että F-T-dieselin tuotannossa käytetään marginaalisähköä. Suurimmat kasvihuonevaikutukset aiheuttavat ketju 4, jossa turvetta tuotetaan metsäojitetuilta soilta eikä jälkikäytössä tuotetun puubiomassan hyödyntämistä ole huomioitu, sekä ketju 5, jossa turve tuotetaan myös metsäojitetulta suolta ja jälkikäyttönä on soistaminen. Kun turvetuotantoalueen pohjaa turpeen tuotannon jälkeen hyödynnetään biomassan tuotantoon (Ketjut 6, 7, 8, 10 ja 11), on ketjun kokonaiskasvihuonevaikutus kaikissa em. ketjuissa alhaisempi jo 50 vuoden sisällä turpeen hyödyntämisestä. Kun suopeltoja hyödynnetään turvetuotantoon (Ketjut 9 ja 10), on kasvihuonevaikutus alhaisempi verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen 300 vuoden ajanjaksolla.

Verrattuna fossiiliseen dieseliin ja metsätähdepohjaiseen F-T-dieseliin saavuttavat turvepohjaiset F-T-diesel-ketjut korkeamman kasvihuonevaikutuksen jo ensimmäisten 50 vuoden aikana. Tämä johtuu mm. siitä, että turve-F-T-dieselin jalostuksen päästöt ovat lähes kuusi kertaa suuremmat kuin fossiilisen dieselin, kun oletusarvoisesti käytetään marginaalisähköä. Myös turpeen tuotannon päästöt ovat korkeimmat verrattuna muihin tarkasteltuihin raaka-aineisiin, varsinkin jos tuotannossa käytetään perinteistä jyrsturvetuotantomenetelmää. Lopputuotteena olevan F-T-dieselin hyödyntämisen päästöt ovat melko samaa tasoa kuin fossiilisen dieselin, mutta biomassapohjaisen F-T-dieselin prosessoinnissa syntyy myös prosessipäästöjä, jotka lisäävät kasvihuonevaikutusta fossiilisen dieseliin nähden.

Ruokohelpi-F-T-dieselin laskennassa oletettiin, että lopputuotteesta ja prosessista ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä, kun kyseessä on hyvin lyhyt hiilen kiertoaika. Metsätähde-F-T-dieselin laskennassa huomioitiin, että tuotannon, jalostamisen ja hyödyntämisen kasvihuonevaikutuksesta vähennetään metsätähteiden hajoamisesta aiheutuva vaikutus. Metsätähteen hajoavat hyvin nopeasti, jo lähes 50 %:a tähteistä on hajonnut ensimmäisten 5–10 vuoden aikana hakkuusta, minkä vuoksi metsätähde-F-T-dieselin kasvihuonevaikutus kokonaisuudessaan pysyy alhaisena verrattuna muihin ketjuihin. Turve-F-T-dieselin tuotanto- ja hyödyntämisketjuissa huomioitiin myös hyödynnettävän turvemaan päästöt. Kun turvetta tuotetaan suopelloilta, on turpeen hajoaminen niin voimakasta, että on ilmastolle edullista ottaa nämä alueet käyttöön. Metsäojitetuilta soilta turpeen hajoaminen on huomattavasti hitaampaa, minkä vuoksi nämä eivät ole yhtä edullisia hyödyntää kuin suopellot.



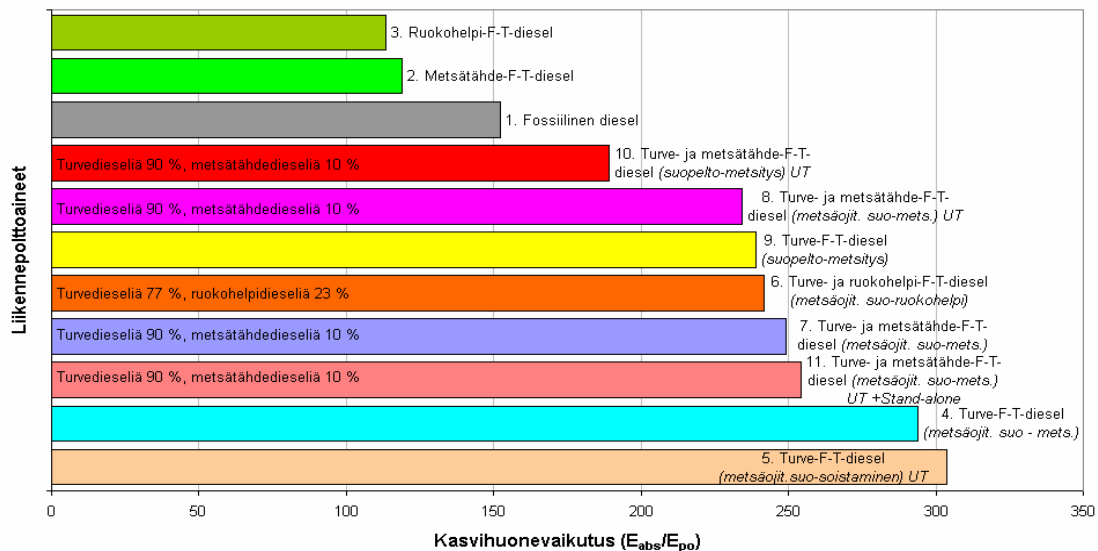
Kuva 7. Eri liikennepolttoaineketjujen kumulatiivinen kokonaiskasviuonevaikutus ajan funktiona 0–300 vuoden ajanjaksolta.

Tässä työssä kasviuonevaikutusta tarkasteltiin kahdelta eri ajanjaksolta, 100 ja 300 vuodelta. Kuvasta 8 käy ilmi tarkasteltujen liikennepolttoaineiden kumulatiivinen kasviuonevaikutus 100 vuoden tarkasteluajalta. Tällä tarkasteluajalla on uusiutuvan biomassan (Ketju 3: ruokohelppi ja Ketju 2: metsätähde) jalostaminen F-T-dieseliksi ja sen hyödyntäminen ilmastonäkökulmasta edullisinta muihin ketjuihin nähden. Turpeen hyödyntäminen F-T-dieseliksi on tällä ajanjaksolla kannattavinta, kun aluetta hyödynnetään sekä turpeen että uusiutuvan biomassan tuotantoon jälkikäytössä. Tällä aikavälillä on turpeen hyödyntäminen F-T-dieselin tuotantoon ilmastolle edullisinta, kun turve tuotetaan suopelloilta uudella tuotantomenetelmällä (UT) ja turvetuotantoalueen pohja metsitetään ja syntyneitä puubiomassaa käytetään F-T-dieselin raaka-aineena (Ketju 10).

Uusi turpeen tuotantomenetelmä alentaa kasviuonevaikutusta jonkin verran verrattuna nykyiseen jyrshinturvetuotantomenetelmään (vrt. Ketjut 7 ja 8). Sekä metsitys että ruokohelven viljeleminen ovat ilmaston kannalta lähes yhtä suotuisia jälkikäsitteilyvaihtoehtoja, ruokohelven viljeleminen jälkikäsitteilyssä aiheuttaa hieman alhaisemman kasviuonevaikutuksen (vrt. Ketjut 6 ja 7). Jos F-T-dieseliä tuotetaan integroidun tuotannon sijaan stand-alone-tuotannossa, se aiheuttaa suuremman kasviuonevaikutuksen (vrt. Ketjut 8 ja 11). Stand-alone-tuotannossa on raaka-aineen tarve huomattavasti suurempi kuin integroidussa tuotannossa, mutta taas ostosähkön tarve on merkittävästi pienempi. Stand-alone-tuotannossa turpeen ollessa raaka-aineena on raaka-ainetarve jopa 78 % suurempi verrattuna tuotettuun F-T-dieseliin. Tämä johtaa siihen, että sekä

tuotannosta että prosessista syntyy paljon enemmän häviöpäästöjä kuin integroidussa tuotannossa, mutta taas vähäisestä ostosähkön tarpeesta johtuen tarvittavan sähkön tuotannosta aiheutuvat päästöt ovat pienet.

Eri liikennepolttoaineiden kasvihuonevaikutus 100 vuoden tarkasteluajalta

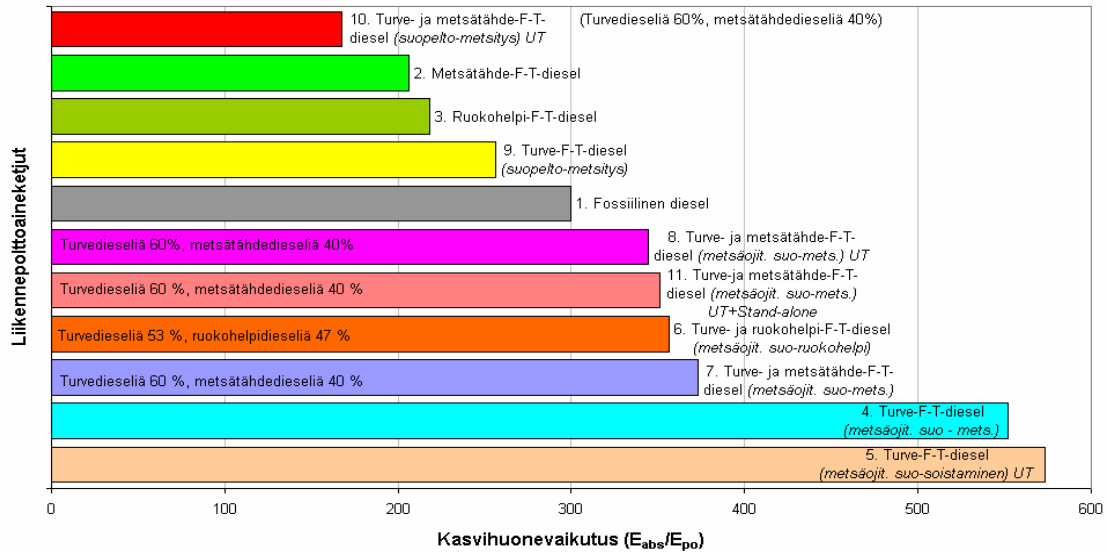


Kuva 8. Eri liikennepolttoaineiden kasvihuonevaikutus 100 vuoden tarkasteluajalla suuruusjärjestyksessä.

Kun tarkastellaan eri liikennepolttoaineketjujen kasvihuonevaikutusta 300 vuoden ajanjaksolla (kuva 9), on ilmastolle edullisinta hyödyntää suopelto ensin turve-F-T-dieselin tuotantoon, jonka jälkeen alue metsitetään ja syntynyttä puubiomassaa käytetään F-T-dieselin tuotantoon (Ketju 10). Myös suopellon hyödyntäminen pelkästään turpeen tuotantoon on ilmastönäkökulmasta suotavampaa kuin fossiilisen polttoaineen hyödyntäminen. Myös sekä metsätähde- että ruokohelppipohjaisen F-T-dieselin tuotanto ja hyödyntäminen on ilmastolle edullisempaa kuin fossiilisen dieselin hyödyntäminen. Pitkän aikavälin tarkastelussa korostuu jälkikäytön hyödyntämisen edullisuus verrattuna tilanteisiin, jossa jälkikäyttöä ei hyödynnetä (Ketju 4) tai jälkikäyttönä on soistaminen (Ketju 5).

Pidemmässä 300 vuoden tarkastelussa saavat vahvistusta aiemman lyhyemmän tarkasteluajanjakson tulokuvassa esille tulleet seikat. Turpeen käytössä F-T-dieselin raaka-aineena uusi turvetuotantomenetelmä vähentää kasvihuonevaikutusta verrattuna nykyiseen jyrshinturvetuotantomenetelmään (vrt. Ketjut 7 ja 8), turvetuotantoalueen jälkikäytössä ruokohelven viljely ja hyödyntäminen F-T-dieseliksi aiheuttaa hieman pienemmän kasvihuonevaikutuksen kuin metsitys ja tuotetun puubiomassan hyödyntäminen F-T-dieseliksi (Ketjut 6 ja 7). Turve-F-T-dieselin integroitu polttoaineen tuotanto aiheuttaa alhaisemman kasvihuonevaikutuksen kuin stand-alone-tuotanto (vrt. Ketjut 8 ja 11).

Eri liikennepolttoaineiden kasviuonevaikutus 300 vuoden tarkasteluajalta



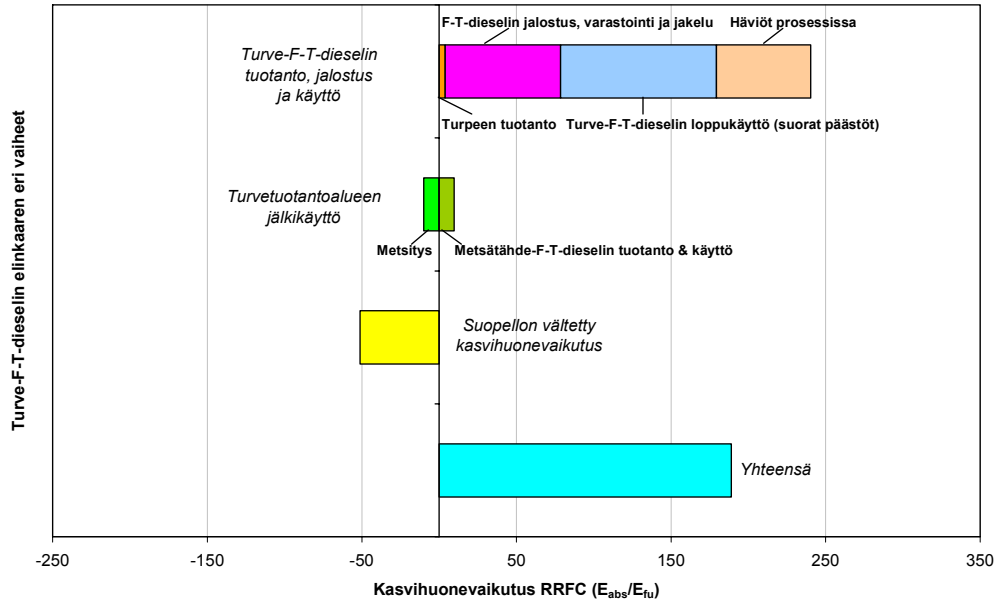
Kuva 9. Eri liikennepolttoaineiden kasviuonevaikutus 300 vuoden tarkasteluajalla suuruusjärjestyksessä.

Kasviuonevaikutus koostuu useammista eri osista. Kuvat 10 ja 11 esittävät ketjun 10 kasviuonevaikutusta jaettuna eri vaiheisiin 100 ja 300 vuoden tarkasteluajoilla. Ketjussa 10 turve tuotettiin suopelloilta, jotka ovat merkittäviä kasviuonekaasulähteitä. Kun suopelto hyödynnetään turvetuotantoon, vältetään tarkasteluajalla muutoin vapautuvien päästöjen kasviuonevaikutukselta (keltainen palkki), jos suopelto pysyisi luonnontilassaan ja kehittyisi normaalisti. Tämä huomioidaan laskennassa vähentämällä turpeen tuotannon, F-T-dieselin jalostuksen ja käytön sekä jälkikäsitteilyn aiheuttamasta kasviuonevaikutuksesta em. suopellon vältetty kasviuonevaikutus, jolloin suopellon edullisuus kasvaa ajan myötä, kun pidemmällä 300 vuoden aikavälillä suopellon sisältämä turvekerros ehtii kokonaisuudessaan hajota aiheuttaen näin päästöjä (suopellon sisältämä turve hajoaa keskimääräisellä hajoamisnopeudella kokonaan n. 200 vuodessa).

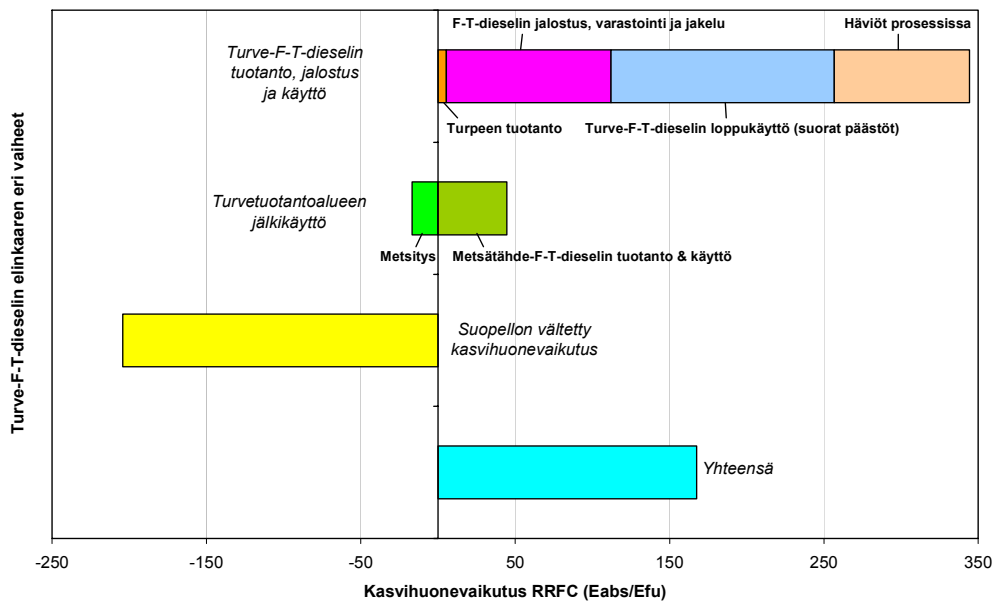
Sadan vuoden tarkastelussa (kuva 10) merkittävimiksi tekijöiksi kasviuonevaikutusta arvioitaessa muodostuvat turpeen jalostus F-T-dieseliä, dieselin loppukäyttö sekä prosessipäästöt (häviöt) prosessissa. Turvetuotantoalueen jälkikäytön vaikutus on neutraali, sillä metsityksen tuoma hiilinielu kumoutuu, kun syntyneestä puubiomassasta jalostetaan F-T-dieseliä.

300 vuoden ajanjaksolla (kuva 11) ketjun 10 kokonaiskasviuonevaikutuksen merkittävimpiä tekijöinä ovat, kuten 100 vuoden kuvan kohdalla, turvedieselin jalostamisen, loppukäytön sekä prosessipäästöjen lisäksi suopelloilta aiheutuneiden päästöjen välttäminen. Pidemmällä aikavälillä myös turvetuotantoalueelta saadaan tuotettua enemmän puubiomassaa, jonka tuotanto osaltaan hieman lisää kokonaiskasviuonevaikutusta.

Kokonaiskasvihuonevaikutus on pidemmän aikavälin tarkastelussa hieman pienempi kuin sadan vuoden tarkastelussa.



Kuva 10. Ketjun 10 vaiheittainen kasvihuonevaikutus 100 vuoden ajanjaksolta.



Kuva 11. Ketjun 10 vaiheittainen kasvihuonevaikutus 300 vuoden ajanjaksolta.

Työssä tarkasteltiin myös F-T-dieselin tuotantoprosessissa käytetyn sähkön päästökerroimen vaikutusta kasvihuonevaikutukseen. Oletuksena tutkimuksessa oli, että prosessissa käytetty sähkö on tyypillistä nykyistä marginaalisähköä, kuten sen menetelmällisesti normaaliolosuhteissa kuuluukin olla. Jotta sähkön päästökerroimen vaikutus on

näkyvissä, laskettiin kokonaiskasviuonevaikutus myös oletuksella, että tuotannossa käytettävä sähkö on vähäpäästöistä (käytännössä 0-päästöistä). Toisena herkkyyystarkasteluna tässä työssä oli hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) yhdistäminen prosessiin. Kuvissa 12 ja 13 esitetään näiden eri herkkyyystarkastelujen vaikutus sekä molempien tekijöiden yhteisvaikutus.

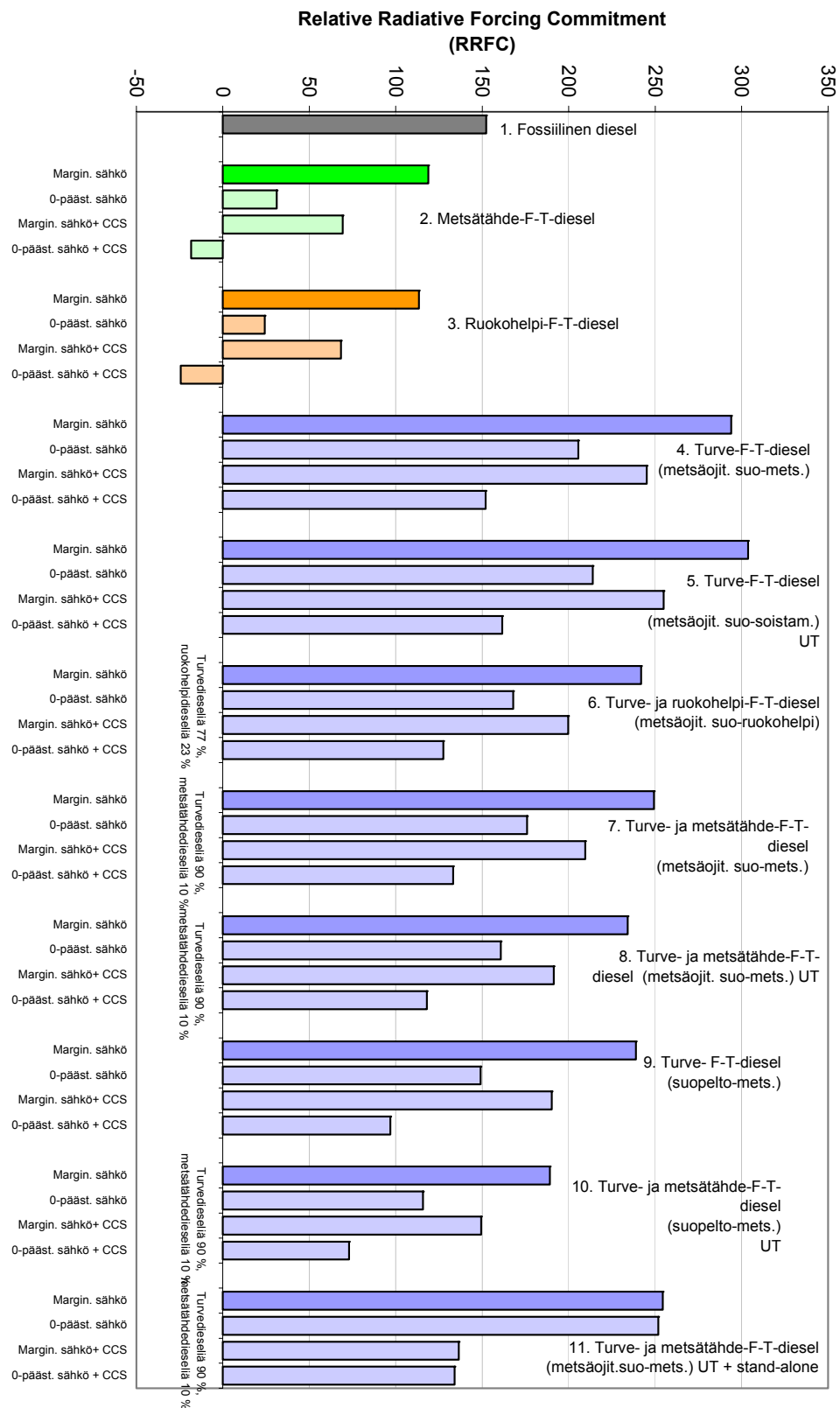
Kuvissa 12 ja 13 on esitetty eri liikennepolttoaineketjujen kasvihuonevaikutus 100 ja 300 vuoden ajanjaksoilta. Tarkasteltuja tapauksia ovat: marginaalisähkön käyttö, nollapäästöisen sähkön käyttö, marginaalisähkö yhdistettynä CCS-tekniikkaan ja nollapäästöinen sähkö yhdistettynä CCS-tekniikkaan. Fossiilisen dieselin tapauksessa sähkön käyttö on vähäistä eikä vaikuta tulokseen. Myös CCS-tekniikan yhdistäminen jalostusprosessiin ei ole yhtä mielekästä fossiilisen dieselin tapauksessa kuin F-T-dieselin kohdalla, sillä prosessipäästöjen määrä verrattuna F-T-dieselin tuotantoon on vähäinen.

F-T-dieselin jalostuksessa käytetyn sähkön päästökertoimella on merkittävä vaikutus eri F-T-dieselin tuotanto- ja hyödyntämisketjujen kasvihuonevaikutukseen. 100 vuoden tarkastelussa on sähkön käytön päästöjen vaikutus F-T-dieselin jalostuksessa huomattava. Turve-F-T-diesel-ketjuissa nollapäästöisen sähkön käyttö saattaa vähentää kasvihuonevaikutusta noin kolmanneksella verrattuna marginaalisähkön käyttöön 100 vuoden tarkasteluajalla. 300 vuoden tarkasteluajalla nollapäästöisen sähkön käyttö vaikuttaa vähintään yhtä voimakkaasti. Tällöin kasvihuonevaikutus saattaa alentua vähintään kolmasosan verrattuna siihen, jos käytetään marginaalisähköä.

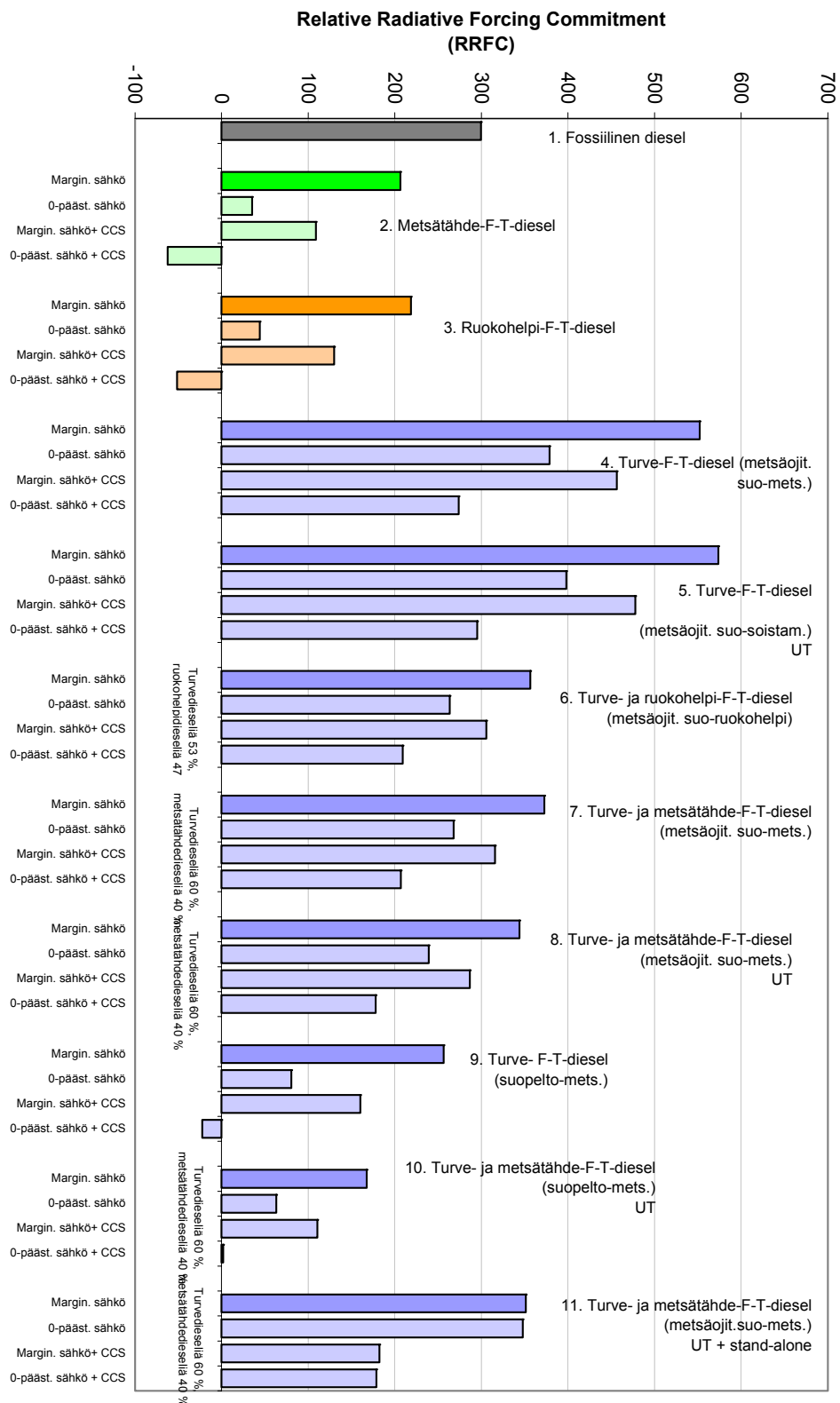
Jos turve-F-T-dieseliä tuotettaisiin stand-alone-tuotannossa (Ketju 11), jolloin ostosähkön kulutus on vähäistä ja raaka-aineen tarve suuri, ei sähkön päästökertoimella ole suurta vaikutusta. Metsätähde- ja ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutuksessa jalostuksessa käytetyn sähkön päästökertoimella on vielä suurempi vaikutus johtuen siitä, että jalostuksella on vielä suurempi merkitys kokonaisvaikutukseen.

CCS:n avulla voidaan vähentää prosessipäästöjä, joista n. 70 % on mahdollista saada talteen. CCS:n vähentää eri liikennepolttoaineketjujen kasvihuonevaikutusta, mutta ei niin paljon kuin nollapäästöisen sähkön käyttö. Poikkeuksena on F-T-dieselin stand-alone-tuotanto, jossa integroitua tuotantoa suuremman raaka-aineen tarpeen vuoksi vapautuu myös enemmän prosessipäästöjä, josta hiilidioksidi voidaan ottaa talteen.

Keinoja, jolla F-T-dieselin tuotannon ja hyödyntämisen vaikutusta ilmastoon saataisiin mahdollisimman alhaiseksi, olisi hyödyntää jalostuksessa nollapäästöistä sähköä sekä yhdistää prosessiin CCS, jolloin osa prosessipäästöistä saataisiin talteen. Tällöin jo 100 vuoden kuluessa metsätähde- ja ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja hyödyntämisen kasvihuonevaikutus olisi negatiivinen eli viilentäisi ilmakehää. Myös suopeltonen hyödyntäminen F-T-dieselin tuotantoon olisi hyvin edullista ilmaston kannalta pitkällä tarkasteluajalla, jos prosessissa käytettäisiin nollapäästöistä sähköä ja prosessiin olisi yhdistetty CCS.



Kuva 12. Eri liikennepolttoaineketjujen kasvihuonevaikutukset (marginaalisähkö, 0-päästöinen sähkö, margin. sähkö + CCS, 0-pääst. sähkö + CCS) sadan vuoden ajanjaksolla.



Kuva 13. Eri liikennepolttoaineketjujen kasvihuonevaikutukset (marginaalisähkö, 0-päästöinen sähkö, margin. sähkö + CCS, 0-pääst. sähkö + CCS) 300 vuoden ajanjaksolla.

7. Pohdinta

Tässä työssä on arvioitu useiden turpeen hyödyntämiseen perustuvien F-T-dieselin tuotantoketjujen kasvihuonevaikutusta elinkaarimielessä dynaamisesti käyttäen vaikutuksen kuvaamiseen säteilypakotetta. Arviot on tehty ilman erityisiä epävarmuustarkasteluja laskentaketjujen suuren määrän vuoksi. Aiemmin turve-energian hyväksikäytön kasvihuonevaikutusta ja sen epävarmuuksia on käsitelty viitteissä Kirkinen et al. 2007a ja 2007b.

Tässä raportissa tarkasteluajoiksi valittiin 100 ja 300 vuotta vertailtaessa eri dieselketjujen kasvihuonevaikutusta. 100 vuoden aikaväli on tärkeämpi ilmastonmuutoksen hillinnän tavoitteiden saavuttamiseksi, koska ilmakehän pitoisuuksien nousu ja siitä seuraava säteilypakotteen kasvu tulee pysäyttää lähivuosisikymmeninä, jos halutaan rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu tiukkaan tavoitteeseen, kuten EU:n ehdottamaan kahteen asteeseen. Lisäksi 300 vuoden aikavälillä epävarmuus kasvaa ja oletuksien realismi 300 vuoden kuluessa on hyvin epävarmaa. Ilmastonmuutoksen hillintätoimenpiteistä riippuen saattaa olla perustellumpaa tutkailla vielä lyhyempiä tarkasteluajanjaksoja. IPCC (2007b) on esitellyt erilaisia ilmakehän pitoisuuksien vakautusskenaarioita riippuen tavoitelluista ilmastonmuutoksen hillinnän tavoitteista. Jos maapallon keskilämpötilan nousu halutaan rajoittaa tasolle 2–3 astetta, tulee maailman päästöjen kääntyä laskuun viimeistään ensi vuosikymmenellä ja olla vuosisadan puolivälissä 30–80 % pienempiä kuin vuonna 2000.

Turve uusiutuu hitaasti luonnontilaisilla soilla, vuosituhannen mittakaavassa. Soiden pohjaa lähellä oleva turve voi olla useita tuhansia vuosia vanhaa. Turpeen uusiutuvuudesta luonnontilaisilla soilla on tehty tutkimuksia mm. Helsingin yliopistossa ja Geologian tutkimuskeskuksessa. Metsäojitetuilla ja viljellyillä suoalueilla, joissa vedenpinta on laskenut ojituksen johdosta, ei enää tapahdu turpeen uusiutumista, vaan turve vähitellen hajoaa, suopelloilla varsin nopeasti. Suopeltojen hyödyntäminen on kasvihuonevaikutuksen suhteen melko edullista, koska suopellot hajoavat kuitenkin parissa sadassa vuodessa vapauttaen sisältämänsä hiilen hiilidioksidina ilmaan. Lisäksi suopellot ovat merkittäviä N₂O-päästöjen lähteitä.

Turpeen tuotantovaiheen päästöjä voidaan vähentää uudella turpeen tuotantomenetelmällä. Menetelmässä on kerrallaan suota avattuna paljon vähemmän kuin tavanomaisessa menetelmässä, minkä vuoksi päästöt jäävät pienemmäksi. Tuotantoalue saadaan myös nopeammin jälkikäsitteilyn piiriin. Turpeen tuotantovaihe muodostaa kuitenkin vain osan tuotanto- ja käyttöketjun kokonaispäästöistä.

Turpeen hyödyntämisen jälkeen energiaturpeen tuotantoalueella voidaan aloittaa biomassan tuotanto. Suonpohjien jälkikäytöllä saadaan lisää maa-alaa bioenergian tuotan-

toon. Jos kasvihuonevaikutusta lasketaan maa-alaperusteisesti, saadaan jälkikäytön tuottamaa biomassaa hyväksikäyttäen keskimääräinen kasvihuonevaikutus jonkin verran pienenemään. Laskelmissa on karkeasti oletettu, että koko jälkikäyttöalueella tuotettu biomassa käytetään F-T-dieselin raaka-aineeksi.

Prosessissa käytettävän apuenergian (lähinnä sähköä) päästöillä on merkittävä vaikutus F-T-dieselin tuotannon kasvihuonekaasupäästöihin. Tarvittavan ostosähkön määrä voidaan minimoida olemattomaksi, mutta tällöin tarvittavan raaka-aineen määrä kasvaa merkittävästi. Se taas voi aiheuttaa hankaluuksia, mikäli saatavilla olevan raaka-aineen määrä on rajoitettu. Kilpailu raaka-aineesta voi myös johtaa seurannaisvaikutuksiin, jossa tällä hetkellä vähemmän päästöistä polttoaineita käyttävät laitokset (esim. pienet lämpölaitokset) joutuvat siirtymään päästöintensiivisemmän polttoaineen käyttöön, jolloin menetelmän kokonaisvaikutus kasvihuonekaasupäästöihin tai niiden vähentämiseen on epäselvä. Metsätähde- tai ruokohelpipohjaisen F-T-dieselin kohdalla ostosähkön korvaaminen raaka-aineen käyttömäärää kasvattamalla voi pienentää F-T-dieselin tuotannon päästöjä merkittävästi tuotettua polttoainetta kohden, jos edellä mainitun tyyppiä seurannaisvaikutuksia ei synny. Siinä tapauksessa metsätähde- tai ruokohelpipohjaisen ketjujen päästövähennykset eivät enää riippuisi suuresti ostosähkön arvotustavasta ja niiden kuvissa 12 ja 13 olevat marginaalisähköpylväät laskisivat suhteellisen lähelle vastaavia nollasähköpylväitä. Sen sijaan ostosähkön korvaaminen turpeella tuskin alentaisi turve-F-T-dieselin tuotannon päästöjä tuotettua polttoainetta kohden.

Vaihtoehtojen taloudellisuutta ei ole käsitelty raportissa. Maankäyttönäkökulma kuitenkin ainakin pitkän ajan kansantaloudellisessa tarkastelussa on selvästi positiivinen tekijä (lisää mahdollisuutta tuottaa uusiutuvaa bioenergiaa). CCS-vaihtoehdon realistisuutta ei ole käsitelty tässä tutkimuksessa. Todennäköisesti ainakin ensimmäiset CCS:n sovellukset koskevat suuria päästölähteitä, joista voidaan järjestää joko putki- tai laivakuljetus hiilidioksidin varastointipaikalle.

8. Yhteenveto

Turvepohjainen F-T-diesel on kasvihuonevaikutukseltaan tarkastelun rajoista, lähtötilanteesta ja jälkikäytöstä riippuen vaihtelevassa asemassa verrattuna fossiiliseen dieseliin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaiseen F-T-dieseliin. Työssä on laskettu kasvihuonevaikutus useissa ketjuissa koskien raakaturpeen hankintaa, prosessointia, suon pohjan jälkikäyttöä ja käytetyn sähkön päästöjä. Tutkimuksessa ei ole arvioitu, miten realistisia laskennassa oletetut lähtöarvot ja rajaukset ovat.

Useissa ketjuissa turvepohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutus on fossiilista dieseliä suurempi. Ilmastovaikutusta saadaan pienemmäksi suuntaamalla tuotantoa erityisesti suopelloille, jotka ovat tällä hetkellä voimakkaita kasvihuonekaasujen lähteitä. Myös uudet teknologiset parannukset turpeen tuotantoon vähentävät ilmastovaikutusta. Jos turvetuotantoalueen pohja hyödynnetään uusiutuvan biomassan tuotantoon, joka jälleen hyödynnetään biodieseliksi, ilmastovaikutus alenee. Kun pohditaan uusia liiketoimintamalleja turpeen hyödyntämiseksi, olisi tärkeää ottaa huomioon, mistä ja miten turve on tuotettu, sekä edelleen, miten alue tulisi jälkikäsitellä ja miten sitä voisi ekologisesti ja taloudellisesti hyödyntää.

Käytetyn turvevaran lisäksi turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutukseen vaikuttavat erityisesti polttoaineen jalostus (häviöt ja käytetty sähkö) sekä loppukäyttö. Normaalisti uudessa sähköä kuluttavassa toiminnassa kulutettava sähkö tulee arvioida marginaalisähköksi, mutta tietyissä erikoistapauksissa myös marginaalisähköstä poikkeava vähäpäästöinen sähkö voi tulla kyseeseen. Tässä tutkimuksessa arvioitiin jalostuksessa käytetyn sähkön päästöjä tyypillisen nykyisen marginaalisähkön että 0-päästöisen sähkön mukaan, jotta sähkön tuotannon päästöjen merkitys tulisi selvästi tuloksissa esille. Sähkön arvottaminen marginaalisähköstä poikkeavaksi, esim. vähäpäästöiseksi sähköksi, vaatisi sen, että tarkasteltavan prosessin voitaisiin objektiivisesti osoittaa lisäävän kyseisen vähäpäästöisen sähkön tuotantoa, jota ei ilman prosessin toteuttamista tapahtuisi. Marginaalisähköstä poikkeaminen sähkön arvottamisessa voi olla käytännössä hankalaa.

Turvepohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutus metsäteollisuuden integroidussa tuotannossa on fossiilista dieseliä pienempi, kun tuotannossa oletetaan käytettävän 0-päästöistä sähköä ja turvemaata hyödynnetään liikennepolttoaineiden tuottamiseen kokonaisvaltaisesti: ensin hyödynnetään turve F-T-dieseliksi, jonka jälkeen alueen jälkikäytössä syntynyttä biomassaa hyödynnetään myös F-T-dieselin tuotannossa. Myös CCS-tekniikan sisällyttäminen F-T-tuotantoprosessiin vähentää F-T-dieselin tuotanto- ja hyödyntämisketjujen kasvihuonevaikutusta. Prosessista saadaan päästönä hiilidioksidia, joka ilman päästämisen sijasta voidaan periaatteessa puristaa kokoon ja kuljettaa hiilidioksidin varastointiin sopivaan geologiseen muodostumaan.

Yksityiskohtaiset tulokset on esitetty luvun 6 kuvissa. Fossiilisesta raakaöljystä valmistettua dieseliä pienemmän kasvihuonevaikutuksen 100 vuoden tarkasteluajalla aiheuttavat metsätähde- sekä ruokohelpipohjaiset F-T-diesel-ketjut, sekä turvepohjaiset F-T-diesel-ketjut, joissa turve on tuotettu suopelloilta ja jalostuksessa on käytetty nollapäästöistä sähköä. Tarkasteluissa tulee huomata, että yhteen ketjuun on yhdistetty eri päästövähennyskeinoja.

300 vuoden tarkasteluajalla turveraaka-aineeseen perustuvien ketjujen asema suhteessa 100 vuoden tarkastelu-aikaan paranee verrattaessa fossiilisesta maaöljystä tehtyyn dieseliin. Tällöin useat turpeen käyttöön perustuvat ketjut aiheuttavat maaöljyketjua pienemmän kasvihuonevaikutuksen erityisesti, jos turve on tuotettu suopelloilta. Myös metsäojitetuilta soilta tuotetun turpeen jalostus F-T-dieseliksi on edullisempaa ilmastonäkökulmasta kuin fossiilisen dieselin hyödyntäminen, jos myös jälkikäytössä syntynyt biomassa hyödynnetään ja jalostuksessa käytetään vähäpäästöistä sähköä. Ruokohelven viljely on hieman ilmastoystävällisempi jälleenkäsittelyvaihtoehto kuin metsitys. Uusi turpeen tuotantomenetelmä vähentää kokonaiskasvihuonevaikutusta verrattuna perinteiseen jyrsturvetuotantomenetelmään. Integroitu F-T-dieselin tuotanto (esim. metsäteollisuuden laitokseen) on hieman edullisempi ilmastonäkökulmasta kuin stand-alone-tuotanto.

Lähdeluettelo

Aro, L. & Kaunisto, S. 2003. Jatkolannoituksen ja kasvatustiheyden vaikutus nuorten mäntymetsiköiden ravinnetilaan sekä puuston ja juuriston kehitykseen paksuturpeisella suonpohjalla. *Suo* 54(2), s. 49–68. Suoseura – Finnish Peat Society. Helsinki.

Edwards, R., Griesemann, J.-C., Larivé, J.-F. & Mahieu, V. 2003. 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 1, December 2003.

EU:n direktiivi 2003/30/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/30/EY, annettu 8. päivänä toukokuuta 2003, liikenteen biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä. EUVL L 123, 17.5.2003. S. 42–46.

Commission of the European Communities 2006. Communication from the Commission – An EU Strategy for Biofuels. COM(2006) 34 final. Brussels 8.2.2006.

Commission of the European Communities 2007. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Biofuels Progress Report; Report on the progress made in the use of biofuels and other renewable fuels in the Member States of the European Union. COM(2006) 845 final. Brussels 10.1.2007.

Holmgren, K., Kirkinen, J. & Savolainen, I. 2006. The climate impact of energy peat utilisation – comparison and sensitivity analysis of Finnish and Swedish results. IVL B-rapport 1681, Stockholm, Sweden.

IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Saatavilla [<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>].

IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers. Saatavilla [<http://www.ipcc.ch/SPM040507.pdf>].

ISO 14040. 1997. Environmental management, Life cycle assessment, Principles and framework. International Organization of Standardization. 12 s.

Kirkinen, J., Hillebrand, K. ja Savolainen, I. 2007a. Turvemaan energiakäytön ilmasto-vaikutus – maankäyttöskenaario Espoo. VTT Tiedotteita – Research Notes 2365. 49 s. + liitt. 2 s. 978-951-38-6890-1; 6891-8.

Kirkinen, J., Minkkinen, K., Penttilä, T., Kojola, S., Sievänen, R., Alm, J., Saarnio, S., Silvan, N., Laine, J. and Savolainen I. 2007b. Greenhouse impact due to different peat fuel utilisation chains in Finland – a life-cycle approach. *Boreal Env. Res.* 12, s. 211–223.

Kirkinen, J., Palosuo, T., Holmgren, K. & Savolainen, I. Toimitettu julkaistavaksi. *Environmental Management*. Greenhouse impact due to the use of combustible fuels – Life cycle viewpoint and Relative Radiative forcing Commitment. Lähetetty 17.8.2007.

Leinonen, A. & Hillebrand, K. 2000. Turpeen asema bioenergiana, Loppuraportti. Jyväskylä: Finbio, Julkaisu 15. 66 s. + liitt. 2 s.

Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M. & Sievänen, R. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*. 189, s. 168–182.

McKeough, P. and Kurkela, E., Detailed comparison of efficiencies and costs of producing FT liquids, methanol, SNG and hydrogen from biomass, 15th European Biomass Conference, Berlin, Germany, May 7–11, 2007.

Monni, S., Korhonen, R. and Savolainen, I. 2003. Radiative forcing due to anthropogenic greenhouse gas emissions from Finland: methods for estimating forcing of a country or an activity. *Environmental Management*, Vol. 31, No. 3, s. 401–411.

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. Espoo: VTT Tiedotteita – Research Notes 2357. 134 s. + liitt.. 19 s. ISBN 951-38-6825-7; 6826-5.

Nilsson, K. & Nilsson, M. 2004. The Climate Impact of Energy Peat Utilisation in Sweden. The Effect of Former Land-use and After-treatment. IVL Swedish Environmental Research Institute, IVL report B1606. 91 s.

Saviharju, K. and McKeough, P., Integrated forest biorefinery concepts, PulPaper 2007, Helsinki, Finland, June 5–7, 2007.

Savolainen, I., Hillebrand, K., Nousiainen, I. & Sinisalo, J. 1994. Greenhouse impacts of the use of peat and wood for energy. Espoo: VTT Tiedotteita – Research Notes 1559. 65 s. + liitt. 9 s. ISBN 951-38-4439-5.

Tilastokeskus 2007. Energiatilastot: Taulukko 1. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin (TJ) ja CO₂-päästöt (Mt). Saatavilla [http://www.stat.fi/til/ehkh/2006/03/ehkh_2006_03_2006-12-20_tau_001.xls]

Uppenberg, S., Zetterberg, L. & Åhman, M. 2001. Climate Impact from Peat Utilization in Sweden. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, IVL Report B 1423. 39 s.

Virtanen, K., Hänninen, P., Kallinen, R.-L., Vartiainen, S., Herranen, T. & Jokisaari, R. 2003. Suomen turvevarat 2000. Geologian tutkimuskeskus (GTK). Tutkimusraportti 156. 101 s. + liitt. 7 s.

Tekijä(t) Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka		
Nimeke Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset		
Tiivistelmä <p>Liikennepolttoaineiden korvaaminen biopohjaisilla polttoaineilla on yhtenä keinona ilmastonmuutoksen hillinnässä ja öljyriippuvuuden vähentämisessä. Suomessa kehitetään biomassan kaasutukseen perustuvia synteettisen biodieselin, ns. Fischer-Tropsch-dieselin, tuotantotekniikoita. Yhtenä raaka-aineena F-T-dieseliin on mahdollista käyttää turvetta, mikä herättää paljon mielenkiintoa Suomen suurten turvevarojen takia. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutusta elinkaarinäkökulmasta. Turpeen ja turvemaan eri hyödyntämistapauksille laskettuja ketjuja verrattiin fossiiliseen dieseliin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaiseen F-T-dieseliin. Kasvihuonevaikutuksen arvioimiseen käytettiin säteilypakotetta. Työssä laskettiin kasvihuonevaikutus useissa tuotantoketjuissa käyttäen erilaisia oletuksia. Työssä ei arvioitu eri oletusten realistisuutta. Laskennallisina tarkasteluajakänteinä käytettiin 100 ja 300 vuotta.</p> <p>Turvepohjainen F-T-diesel on ilmastovaikutukseltaan tarkastelun rajoista, lähtötilanteesta ja jälkikäytöstä riippuen vaihtelevassa asemassa verrattuna fossiiliseen dieseliin sekä metsätähde- ja ruokohelpipohjaiseen F-T-dieseliin. Useissa ketjuissa kasvihuonevaikutus on fossiilista dieseliä suurempi. Jos turve tuotetaan suopelloilta, jotka ovat voimakkaita kasvihuonekaasujen päästölähteitä, on kasvihuonevaikutus pienempi kuin, jos turve tuotetaan metsäojitetuilta soilta. Jos aluetta hyödynnetään turvetuotannon jälkeen kasvattamalla siinä metsää tai viljelemällä ruokohelpeä ja jälkikäytössä tuotettu biomassa hyödynnetään edelleen F-T-dieseliksi, alenee ketjussa tuotetun F-T-dieselin hyödyntämisen kokonaisvaikutus. Fossiiliseen dieseliin verrattuna turvepohjaisen F-T-dieselin aiheuttama kasvihuonevaikutus on pitkällä tarkasteluajalla alhaisempi siinä tapauksessa, että turve tuotetaan suopelloilta.</p> <p>Käytetyn turvevaran lisäksi merkittävimmin turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutukseen vaikuttavat polttoaineen prosessointi (häviöt ja käytetty sähkö) ja loppukäyttö. Prosessissa käytetyn sähkön tuottamisessa aiheutuvilla päästöillä on suuri vaikutus kasvihuonevaikutukseen. Tavallisesti uudessa sähköä kuluttavassa toiminnassa kulutettava sähkö on arvioitava marginaalisähköksi, mutta tietyissä erikoistapauksissa myös marginaalisähköstä poikkeava vähäpäästöinen sähkö voisi tulla kyseeseen. Tässä tutkimuksessa prosessissa kulutettavan sähkön tuotannossa syntyvät päästöt arvioitiin sekä nykyisen tyypillisen marginaalisähkön että nollapäästöisen sähkön mukaan, jotta sähkön tuotannon päästöjen merkitys tulisi selvästi tuloksissa esille. Turvepohjaisen F-T-dieselin kasvihuonevaikutus metsäteollisuuden integroidussa tuotannossa on fossiilista dieseliä pienempi, kun tuotannossa oletetaan käytettävän nollapäästöistä sähköä ja turvemaata hyödynnetään liikennepolttoaineiden tuottamiseen kokonaisvaltaisesti, siis tuotetaan ensin turve-F-T-dieseliiä ja jälkikäytössä (metsitys) syntynyttä puubiomassaa jalostetaan myös F-T-dieseliksi.</p> <p>Työssä arvioitiin myös hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) hyödyntämistä F-T-dieselin tuotannossa. Kansainvälinen ilmastopaneeli on listannut CCS:n yhdeksi merkittäväksi ilmastonmuutoksen hillinnän keinoksi tulevaisuudessa. F-T-dieselin tuotantoprosessissa erotetaan hiilidioksidia prosessiteknisistä syistä, ja erotetusta hiilidioksidista (häviöstä) on mahdollista saada talteen suuri osa, mikä vähentää biomassapohjaisen (turve, metsätähde ja ruokohelpi) F-T-dieselin kasvihuonevaikutusta. Jos F-T-dieselin tuotantoon on sisällytetty CCS, vähenee 300 vuoden tarkasteluajalla turve- ja biomassapohjaisen F-T-dieselin tuotannon kasvihuonevaikutus fossiilisen dieselin vaikutuksen tasolle tai sen alle ketjusta riippuen.</p>		
ISBN 978-951-38-6976-2 (nid.) 978-951-38-6978-6 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 20829
Julkaisuaika Joulukuu 2007	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 45 s.
Projektin nimi Turvedieselin tuotannon ja käytön ilmastovaikutukset		Toimeksiantaja(t) Vapo Oy
Avainsanat transportation fuels, substitution, biofuels, environmental impacts, climatic change, greenhouse impacts, life cycle assessment, radiative forcing, biodiesel, biomass, peat, logging residues, reed canary grass, gasification		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374

Author(s) Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka		
Title The greenhouse impact of the production and use of peat-based F-T-diesel		
Abstract <p>Substituting transportation fuels with biomass-based fuels is presented as one of the options in climate change mitigation and reducing dependency on fossil oil. In Finland, production techniques of synthetic biodiesel have been developed which are based on the gasification of biomass (i.e. Fischer-Tropsch diesel). As a raw material for F-T-diesel production, peat can be used, which raises a lot of interest due to the large peat reserves in Finland. In this study, the greenhouse impact of peat-based F-T-diesel from the life cycle point of view was assessed. The utilisation chains of peat and peatlands assessed were compared to fossil diesel and F-T-diesel based on logging residues and reed canary grass. The greenhouse impact is assessed by radiative forcing. In this study, the greenhouse impact of different production chains was calculated using different assumptions. The reality of different assumptions was not assessed. Calculational time spans were 100 and 300 years.</p> <p>The impact of peat-based F-T-diesel on the climate depends on the system boundaries, the initial situation and the after-treatment, and it varies when compared to the climate impact of fossil diesel as well as logging residues and reed canary grass-based fuels. Greenhouse gas impact of peat-based F-T-diesel is higher compared to fossil diesel in many of the chains considered. If peat is produced from cultivated peatlands, which are powerful sources of greenhouse gases, the greenhouse impact is lower than if peat is produced from forestry-drained peatland. If peatland is utilised after peat production for afforestation or cultivation of reed canary grass and the produced biomass is then utilised for F-T-diesel, it lowers the total greenhouse impact of the F-T-diesel produced in the certain chain. When peat-based F-T-diesel is compared to fossil fuel, the greenhouse impact is lower when the peat is produced from the cultivated peatland.</p> <p>In addition to peat resource utilised the most remarkable impact on the greenhouse impact of peat-based F-T-diesel is the processing of fuel (losses and electricity) and end-use. The greenhouse gas emissions from the production of the electricity used in the production process of F-T-diesel have a major impact on the total greenhouse impact. Usually in a new function, which consumes electricity, the used electricity should be considered as marginal electricity, but in certain special cases, the used electricity can be low-emission electricity. In this study, the used electricity in the F-T-diesel refining process was assessed to be both current typical marginal electricity and zero-emission electricity, which enables us to emphasize the impact of the emissions due to the electricity used. The greenhouse impact of the peat-based F-T-diesel produced as an integrated production in the forest industry plant is lower than fossil fuels, when zero-emission electricity is used in the process and peatland is used comprehensively in F-T-diesel production, i.e. first peat-F-T-diesel is produced and then biomass produced in the after-treatment (afforestation) is also processed as F-T-diesel.</p> <p>The use of carbon capture and storage in the F-T-diesel production process was also assessed. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has listed CCS as one of the significant means to mitigate climate change in the future. In the production of F-T-diesel, carbon dioxide is separated in the process and major part of the separated CO₂ (losses) can be captured, which reduces the greenhouse impact of biomass-based (peat, logging residues and reed canary grass) F-T-diesel. If CCS is included in the F-T-diesel production, it decreases the greenhouse impact of peat and biomass-based F-T-diesel to the same level of impact as that of fossil diesel or below depending on the F-T-diesel production chain.</p>		
ISBN 978-951-38-6976-2 (soft back ed.) 978-951-38-69768-6 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 20829
Date December 2007	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 45 p.
Name of project Turvedieselin tuotannon ja käytön ilmastovaikutukset		Commissioned by Vapo Oy
Keywords transportation fuels, substitution, biofuels, environmental impacts, climatic change, greenhouse impacts, life cycle assessment, radiative forcing, biodiesel, biomass, peat, logging residues, reed canary grass, gasification		Publisher VTT Technical Research Center of Finland P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

VTT on arvioinut turpeesta tuotetun dieselin tuotanto- ja käyttöketjun kasvihuonekaasutaseita. Turvepohjainen F-T-diesel on kasvihuonevaikutukseltaan tarkastelun rajoista, aikajänteestä, lähtötilanteesta sekä jälkikäytöstä riippuen vaihtelevassa asemassa verrattuna fossiiliseen dieseliin. Työssä on laskettu kasvihuonevaikutus useissa ketjuissa koskien raakaturpeen hankintaa, prosessointia, suon pohjan jälkikäyttöä ja käytetyn sähkön päästöjä. Käytetyn turvevaran lisäksi turve-F-T-dieselin kasvihuonevaikutukseen vaikuttavat eniten polttoaineen jalostus (häviöt ja käytetty sähkö) sekä loppukäyttö. Useissa ketjuissa kasvihuonevaikutus on fossiilista dieseliä suurempi. Periaatteessa on mahdollista päästä fossiilista dieseliä pienempään kasvihuonevaikutukseen erityisesti, jos turveraaka-aineen tuotanto tapahtuu suopelloilta ja jos prosessissa voidaan käyttää vähäpäästöistä sähköä.

Julkaisu on saatavana

VTT
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

Publikationen distribueras av

VTT
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

This publication is available from

VTT
P.O. Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4520
<http://www.vtt.fi>