



LOHKO-KHK-hankkeen loppuraportti

Ilmatieteen laitos, yhteyshenkilö Jari Liski (jari.liski@fmi.fi)

Luonnonvarakeskus, yhteyshenkilö Maarit Liimatainen (maarit.liimatainen@luke.fi)

Sisällysluettelo

1. Hankkeen esittely	2
1.1. Perustiedot hankkeesta	2
1.2. Hankkeen tavoitteet.....	2
1.3. Yhteenveto hankkeesta.....	3
1.4. Sammanfattning av projektet.....	5
2. Hankkeen toteutus ja toteutusvaiheen arviointi	6
2.1. Menetelmät ja aineisto.....	6
2.2. Aikataulu ja resurssit	7
2.3. Kustannukset ja rahoitus	8
2.4. Raportointi, julkaisut ja seuranta	9
2.5. Toteutusvaiheen arviointi	10
3. Tulokset ja niiden arviointi.....	11
3.1. Tulosten esittely	11
3.2. Tulosten vieminen käytäntöön.....	14
3.3. Tulosten merkitys ja jatkotoimenpiteet.....	14
4. Toimintasuositukset ja hankkeen muut tuotokset	16

1. Hankkeen esittely

1.1. Perustiedot hankkeesta

Hankkeen nimi: Kohti peltolohkokohtaista kasvihuonekaasulaskentaa: uudet päästökertoimet ja mallitusratkaisut sekä päivitettävä järjestelmä (LOHKO-KHK)

Toteuttajat: Ilmatieteen laitos (IL) ja Luonnonvarakeskus (Luke)

Rahoituksen käyttöaika: 1.1.2022 - 15.11.2024

1.2. Hankkeen tavoitteet

a. Päättavoite ja yksityiskohtaiset tavoitteet

Hankkeen **päättavoitteena** on kehittää järjestelmä Suomen peltolohkokohtaista kasvihuonekaasulaskentaa varten. Järjestelmästä kehitetään niin hyvä kuin nykyinen ja hankkeen aikana karttuva mittaustieto, mallitusosaaminen ja tietojärjestelmäosaaminen mahdollistavat. Lisäksi järjestelmästä kehitetään sellainen, että se huomioi muuttuvat ympäristö- ja viljelyolosuhteet ja että sitä voidaan päivittää hankkeen jälkeenkin, kun mittaustietoa ja muuta osaamista karttuu.

Tavoitteen saavuttamiseksi kokoamme yhteen a) relevantit **mittausaineistot**, b) sopivimmat **tilastolliset mallitusmenetelmät ja simulointimallit**, c) peltojen kasvihuonekaasulaskentaan kehitetyn edistyneen **tieto- ja laskentajärjestelmän** sekä d) tehokkaat kanavat parannettujen menetelmien **käyttöönottoon** peltojen kasvihuonekaasulaskennan eri käyttökohteissa.

Hankkeen **yksityiskohtaiset tavoitteet** ovat

1. muodostaa **kokonaiskuva** a) eri maalajien ja viljelytapojen, mm. typpilannoituksen, maanmuokkauksen ja kasvipeitteisyyden, vaikutuksista peltolohkokohtaisiin kasvihuonekaasu- ja hiilitaseisiin sekä b) tiedon tasosta ja kattavuudesta,
2. kuvata eri **maalajien ja viljelytapojen vaikutukset** suomalaisten viljelyjärjestelmien päästökertoimiin ja simulointimalleihin,

3. lisätä parannettu mittaus- ja mallitustieto maatalouden **kasvihuonekaasulaskennan keskeisiin järjestelmiin** (kasvihuonekaasulaskennan inventaariot, kasvihuonekaasujen skenaariolaskenta, elinkaari- ja hiilijalanjälkilaskenta sekä hiilimarkkinoiden laskenta),
4. määrittää **parannetun tiedon merkitys** kasvihuonekaasulaskennalle,
5. tunnistaa jäljelle jäävät merkittävimmät **tiedon puutteet** jatkokehitystä varten,
6. luoda järjestelmä, joka tukee kasvihuonekaasulaskennan järjestelmien **päivittämistä tulevaisuudessa** mittaus- ja mallitustiedon karttuessa ja ilmaston muuttuessa.

b. Vaikutus maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteiden määrärahan käytön tavoitteisiin

Hanke edistää “siirtymää kohti ilmastokestävää maa- ja metsätaloutta ja muuta maankäyttöä (LULUCF)”, koska hankkeessa kehitettävillä menetelmillä voidaan arvioida kasvihuonekaasujen sidonta ja päästöt peltolohkokohtaisesti ja huomioida viljelytoimien vaikutus tässä laskennassa. Tällainen laskenta mahdollistaa maanviljelyn ilmastotoimenpiteiden suunnittelun nykyistä yksityiskohtaisemmin, vaikutusten seurannan ja ohjaustoimenpiteiden kehitystyön. Näin ollen hanke edesauttaa kaikkien neljän hankehaun kuvauksessa mainitun maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteen tavoitteen toteutumista: ylläpitää hiilinieluja ja -varastoja, vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, edistää sopeutumista ilmastomuutokseen ja tuottaa tietoa ilmastotoimien tueksi sekä edistää tämän tiedon käyttöä. Ilmastomuutokseen sopeutumista edistää se, että kivennäismaapeltojen orgaaninen aines lisää niiden sietokykyä ilmastomuutoksen vaikutuksia vastaan.

1.3. Yhteenveto hankkeesta

Hankkeen "Kohti peltolohkokohtaista kasvihuonekaasulaskentaa" (LOHKO-KHK) **päätavoitteena oli luoda tarkka ja päivitettävä järjestelmä Suomen peltolohkojen kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan**, jossa huomioidaan erilaiset viljely- ja ympäristöolosuhteet. Hankkeessa yhdistettiin **Ilmatieteen laitoksen** (IL) ja **Luonnonvarakeskuksen** (Luke) asiantuntemus, **vastuuhenkilöinä Jari Liski** (IL) ja **Maarit Liimatainen** (Luke). **Kokonaisbudjetti** oli 1 070 996 euroa, josta **Maa- ja metsätalousministeriön (MMM) myöntämä osuus** oli 749 697 euroa ja **omarahoitusosuus** 321 299 euroa.

Hanke jakaantui viiteen toisiinsa liittyvään vaiheeseen, joissa **koottiin tietoa mittausaineistoista, kehitettiin uusia malleja, luotiin peltolohkokohtaisia laskentamenetelmiä, ja testattiin laskentajärjestelmän käytännön soveltuvuutta.** Aluksi kerättiin ja analysoitiin olemassa olevia mittausaineistoja, jotta muodostuisi kokonaiskuva eri viljelytapojen ja maalajien vaikutuksesta peltolohkojen kasviuonekaasutaseisiin. Näiden pohjalta kehitettiin tilastollisia ja simulointimalleja, kuten BASGRA-Yasso ja LandscapeDNDC, joilla voidaan arvioida hiili- ja typpioksiduulitaseita eri viljelyolosuhteissa. Mallit ottavat huomioon myös ilmastonmuutoksen vaikutukset ja vaihtelevat sääolosuhteet.

Yksi hankkeen tulos oli **uuden Sentinel-2-Yasso -menetelmän kehitys** peltolohkojen hiilitaseiden arviointiin. Sentinel-2-satelliitin mittaaman lehtivihreäindeksin ja säteilytiedon avulla menetelmä arvioi biomassan tuotannon päivittäin ja maaperän hiilisyötteen vuositasolla. Maaperän hiilitase lasketaan Yasso20-mallilla, turvemaille on käytetty LandDNDC-mallia.

Menetelmän biomassaosaa kalibroitiin Ilmatieteen laitoksen ja Helsingin yliopiston pyörrekovarianssimittausten avulla. Biomassa-arvioiden luotettavuutta arvioitiin vertaamalla tuloksia mittauksiin Carbon Action -aloitteen viljelijöiden pelloilla. Pyörrekovarianssi- ja biomassamittaukset tehtiin muissa hankkeissa. Maaperän hiilisyötearvioita verrattiin nykyiseen kansalliseen kasviuonekaasujen inventaariojärjestelmään kolmen ELY-keskuksen alueella. Ilmatieteen laitoksen tutkimusryhmä arvioi, että menetelmää voidaan käyttää erilaisissa kasviuonekaasujen inventaarioissa.

Simulointimallien soveltaminen hiili- ja kasviuonekaasulaskennoissa osoittautui vaikeammaksi kuin ennalta arvelimme. Malleja oli vaikea kalibroida niin, että ne sopisivat erilaisiin mittauksiin ja kuvaisivat vuosien ja vuodenaikojen välistä vaihtelua. Tästä huolimatta simulointimallien kehitystyön jatkaminen on tärkeää, sillä niitä tarvitaan eri tekijöiden vaikutusten analysointiin ja tulevaisuuden ennusteiden tekoon.

Käytännön laskentajärjestelmässä mittausaineistot yhdistettiin uusiin mallinnustyökaluihin. **Kehitetty järjestelmä tuottaa peltolohkokohtaista päästötietoa,** jota voidaan käyttää esimerkiksi elintarvikealan yritysten hiilijalanjälkilaskennassa. **Hankkeessa luotiin palvelumalli,** jossa yritykset voivat hyödyntää peltolohkokohtaisia laskentatietoja osana tuotteidensa ympäristöarvioiteja. **Lisäksi kehitettiin laskentamalleja hiilimarkkinoiden tarpeisiin,** jolloin voidaan arvioida peltomaahan sidotun hiilen pysyvyyttä ja vaikutusta hiilitaseeseen.

Hankkeen tulokset edistävät kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion ja maankäyttösektorin hiilen arviointimenetelmien kehittämistä. Sentinel-2-Yassomenetelmä on näistä yksi esimerkki. Hankkeessa korostettiin mittaus- ja analyysimenetelmien harmonisoinnin, pitkien aikasarjojen sekä datanhallinnan merkitystä, jotta aineistot olisivat vertailukelpoisia ja tukisivat mallinnustyötä mahdollisimman tehokkaasti. **Hankkeen tuloksena syntyi viisi tieteellistä julkaisua, yhdeksän käsikirjoitusta ja yksi laaja 'Perspective'-tyyppinen artikkeli.**

1.4. Sammanfattning av projektet

Projektet "Mot åkerskiftesbaserad växthusgasberäkning" (LOHKO-KHK) hade som **huvudsakligt mål var att skapa ett exakt och uppdateringsbart system för att beräkna växthusgasutsläpp från Finlands åkerskiften**, där olika odlings- och miljöförhållanden tas i beaktande. Projektet genomfördes av **Meteorologiska institutet (FMI)** och **Naturresursinstitutet (Luke)**, med **Jari Liski (FMI)** och **Maarit Liimatainen (Luke)** som ansvarspersoner. Den **totala budgeten** var 1 070 996 euro, **varav Jord- och skogsbruksministeriet (JSM) bidrog** med 749 697 euro och **egenfinansieringen** utgjorde 321 299 euro.

Projektet delades upp i fem sammanhängande faser som omfattade **insamling och analys av mätdata, utveckling av nya modeller, utformning av åkerskiftesbaserade beräkningsmetoder samt testning av beräkningssystemets praktiska tillämpning**. Befintliga mätdata samlades in och analyserades för att ge en helhetsbild av hur olika odlingsmetoder och jordtyper påverkar växthusgasbalansen på åkerskiften. Utifrån detta utvecklades statistiska och simuleringsbaserade modeller, såsom BASGRA-Yasso och LandscapeDNDC, som möjliggör uppskattningar av kol- och dikväveoxidbalanser under olika odlingsförhållanden. Modellerna tar även i beaktande effekterna av klimatförändringen och varierande väderförhållanden.

Ett av **resultaten i projektet var utvecklingen av den nya metoden Sentinel-2-Yasso**, som möjliggör bedömning av kolbalansen på åkerskiftesnivå. Metoden använder klorofyllindex och strålningsdata från Sentinel-2-satelliten för att beräkna den dagliga biomassaproduktionen och den årliga kolinlagringen i marken. Markens kolbalans beräknas med hjälp av Yasso20-modellen, på torvmarkerna används LandscapeDNDC. Metodens biomassakomponent kalibrerades med hjälp av Meteorologiska institutets och Helsingfors universitetets virvelkovariansmätningar (EC, eddy-covariance). Virvelkovarians- och biomassamätningarna utgjordes inom andra projekt.

Biomassaberäkningarnas tillförlitlighet utvärderades genom att jämföra resultaten med mätningar från åkrar som ingår i Carbon Action-initiativet. Markens kolbalansberäkningar jämfördes med det nationella växthusgasinventeringssystemet i tre NTM-centralers områden. Forskargruppen vid Meteorologiska institutet konstaterade att metoden kan användas i olika växthusgasinventeringar.

Att tillämpa **simuleringsmodeller** för beräkning av kol- och växthusgasbalanser visade sig vara svårare än vi hade förväntat oss. Det var utmanande att kalibrera modellerna så att de passade olika mätningar och kunde beskriva variationer mellan år och årstider. Trots detta är det viktigt att fortsätta utvecklingen av simuleringsmodeller, eftersom de behövs för att analysera olika faktorer påverkan och för att göra framtidsprognoser.

I det praktiska beräkningssystemet kombinerades mätdata med nya modelleringsverktyg, vilket **resulterade i ett system som levererar åkerskiftesbaserad utsläppsdata**. Detta kan exempelvis användas av livsmedelsföretag för att beräkna produkternas koldioxidavtryck. Inom projektet **utvecklades även en servicemodell** som gör det möjligt för företag att använda åkerskiftesbaserade beräkningsdata som en del av sina miljöbedömningar. Dessutom **utvecklades beräkningsmodeller för att möta behoven på kolmarknaden**, vilket möjliggör utvärdering av kolbindningens varaktighet i marken och dess påverkan på kolbalansen.

Projektets resultat bidrar till utvecklingen av den nationella växthusgasinventeringen och andra metoder för att bedöma kolbalansen inom markanvändningssektorn. Sentinel-2-Yasso-metoden är ett exempel på detta. Projektet underströk vikten av att harmonisera mät- och analysmetoder samt förbättra databehandlingen för att säkerställa jämförbarhet och optimalt stöd för modelleringsarbetet. **Totalt resulterade projektet i fem vetenskapliga publikationer, nio manuskript och en omfattande 'Perspective'-artikel.**

2. Hankkeen toteutus ja toteutusvaiheen arviointi

2.1. Menetelmät ja aineisto

Hankkeessa kartoitimme Suomessa tehtyjä ja käynnissä olevia mittauksia ja tutkimuksia, jolloin saimme kokonaiskuvan olemassa olevista dataseteistä. Näiden joukosta valitsimme hankkeeseen parhaiten soveltuvat aineistot. Tämän lisäksi kehitimme mallitusmenetelmiä sekä tieto- ja laskentajärjestelmää ja teimme kattavan kirjallisuustutkimuksen.

Mittausaineistot:

- Pyörrekovarianssimittaukset: Kasviuonekaasujen vaihdon jatkuva mittaus pelloilla (IL, Luke, HY).
- Kammiomittaukset: Kasviuonekaasupäästöjen paikalliset mittaukset pellon pinnasta (Luke, IL).
- Maaperän hiilimäärän mittaukset (Valse-aineisto, Luke).
- Sentinel-2 -satelliittitieto: Satelliittikuva-aineisto kasvien kehityksen ja biomassan arviointiin.

Tilastolliset mallitusmenetelmät:

- Tilastollinen fotosynteesimalli: Malli yhteytystuotoksen arvioimiseksi säteilytiedon ja lehtivihreän avulla ($GPP(\text{päivä}) = f(\text{PAR}, \text{CI red edge})$)

Simulointimallit:

- BASGRA: Malli kasvukauden hiilitaseiden simulointiin.
- LandscapeDNDC: Malli hiilen ja typen kierron arviointiin.
- BASGRA-emulaattori: Yksinkertaistettu versio BASGRA-mallista, soveltuu laajempaan käyttöön.
- Yasso20: Maaperän hiilen hajoamisen ja varaston muutosten malli kivennäismailla.

Tieto- ja laskentajärjestelmä:

- IL:n tietojärjestelmä, joka yhdistää mallit, syöttötiedot ja mittaustiedot

Kirjallisuustutkimus:

- 'Perspective'-tyyppinen tieteellinen kirjoitus peltolohkokohtaisesta hiili- ja kasviuonekaasuarvioinnista: Palosuo ym. 2024, Demands and possibilities for field-scale estimation of agricultural greenhouse gas balances, Catena (arvioitavana).

2.2. Aikataulu ja resurssit

Hankkeen toteuttivat IL:n ja Luken tutkimusryhmät hankesuunnitelman mukaisesti. IL johti hanketta ja vastasi työpaketeista TP2 Mallien kehitys ja TP3 Tietojärjestelmä. Luke vastasi työpaketeista TP1 Mittausaineistot ja TP4 Kasviuonekaasulaskennan järjestelmät. IL ja Luke tekivät yhteistyötä jokaisessa työpaketissa. Yhteistyö sujui hyvin. Hanke eteni aikataulun mukaisesti.

2.3. Kustannukset ja rahoitus

Hankkeen kokonaiskustannukset on esitetty hanketoimijoittain ja koko hankkeen osalta taulukossa 1. Kaikki hankkeessa tehdyt matkat olivat kotimaan matkoja. IL:n kohdalla “Tarvikkeet”-kustannus oli Agisoft Metashape -ohjelmistolisenssi.

Pääosin hanketoimijat käyttivät MMM:n myöntämän rahoituksen kokonaisuudessaan. Ensimmäisenä vuonna niin IL:ltä kuin Lukeltakin jäi kuitenkin osa rahasta käyttämättä, mitä ei enää seuraavina vuosina pystynyt laskuttamaan johtuen siirtomäärärahan käyttöajan päättymisestä.

Taulukko 1. Hankkeen kustannukset ja rahoitus.

Kulut, €	Budjetti	Toteuma	Erotus
Ilmatieteen laitos (IL)			
<i>Palkat</i>	204 009	206 980,80	-2 971,80
<i>Palkan sivukulut</i>	108 124	113 839,40	-5 715,40
Palkat yhteensä	312 133	320 820,19	-8 687,19
Matkat	12 000	898,94	11 101,06
Julkaisukustannukset	6 000	3 280	2 720
Tarvikkeet		3 585,38	-3 585,38
Yleiskulut	240 654	244 464,98	-3 810,98
Yhteensä (IL)	570 787	569 464,11	1 322,89
Oma rahoitus (IL)	171 236	176 067,04	-4 831,04
MMM rahoitus (IL)	399 551	393 397,07	6 153,93
Luonnonvarakeskus (Luke)			
<i>Palkat</i>	172 946	173 684,68	-738,68
<i>Palkan sivukulut</i>	89 932	88 579,18	1 352,82
Palkat yhteensä	262 878	262 263,86	614,14
Matka/muut kulut	6 000	3 436,91	2 563,09
Yleiskulut	231 332	233 414,84	-2 082,84

Kulut, €	Budjetti	Toteuma	Erotus
Yhteensä (Luke)	500 209	499 115,61	1 093,39
Oma rahoitus	150 063	149 734,68	328,32
MMM rahoitus	350 146	349 380,93	765,07
Hankkeen kulut yhteensä	1 070 996	1 068 579,72	2416,28
MMM rahoitus yhteensä	749 697	742 778	6 919
Oma rahoitus yhteensä	321 299	325 801,72	-4 502,72

2.4. Raportointi, julkaisut ja seuranta

Hankkeessa valmistui 5 julkaisua ja 10 käsikirjoitusta.

Julkaisut:

Gerin, S., Vekuri, H., Liimatainen, M., Tuovinen, J-P., Kekkonen, J., Kulmala, L., Laurila, T., Linkosalmi, M., Liski, J., Joki-Tokola, E. & Lohila, A. Two contrasting years of continuous N₂O and CO₂ fluxes on a shallow-peated drained agricultural boreal peatland, *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109630>

Heikkinen, J., Kostensalo, J., Keskinen, R., Soinne, H. & Nuutinen, V. Temporal trends in Finnish agricultural soils: A comparative analysis of national and LUCAS soil monitoring datasets. *European Journal of Soil Science* 75, e13525, 2024.

<https://doi.org/10.1111/ejss.13525>

Heimsch, L., Vira, J., Fer, I., Vekuri, H., Tuovinen, J-P., Lohila, A., Liski, J. & Kulmala, L. Impact of weather and management practices on greenhouse gas flux dynamics on an agricultural grassland in Southern Finland, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 374, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109179>

Salonen, A-R., de Goede, R., Creamer, R., Soinne, H. & Nuutinen, V. Soil organic carbon fractions and storage potential in Finnish arable soils. *European Journal of Soil Science* 75, e13527, 2024. <https://doi.org/10.1111/ejss.13527>

Vekuri, H., Tuovinen, J-P., Kulmala, L., Papale, D., Kolari, P., Aurela, M., Laurila, T., Liski, J. & Lohila, A. A widely-used eddy covariance gap-filling method creates systematic bias in carbon balance estimates. *Scientific Reports*, 13, 1720, 2023.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-28827-2>

Käsikirjoitukset:

- Aakula ym. Emulation and calibration of an agroecosystem model using Long Short-term Memory networks (in preparation)
- Höyhtyä ym. Greenhouse gas emissions from managed boreal peatlands under different land-use in Northern Finland (in preparation)
- Kajasilta ym. The effects of peat thickness and water table depth on the CO₂ emissions of an agricultural peatland - a process-based modeling approach (in preparation)
- Läpikivi ym. Catchment-based approach for water table management with irrigation for cultivated peatlands (in preparation)
- Niiranen ym. Impact of peat depth on soil conditions, plant growth, and greenhouse gas emissions on a boreal agricultural drained peatland (in preparation)
- Palosuo ym. Demands and possibilities for field-scale estimation of agricultural greenhouse gas balances. Catena (in review)
- Tang ym. Towards a flexible and lightweight model for simulating carbon and water balance in agriculture fields (FL-CaWa) Part I: Model sensitivity to crop hydraulic traits and emergent drought response (in preparation)
- Tung ym. Hydrological monitoring in a Northern peatland and implications from management (in preparation)
- Vekuri ym. Improved uncertainty estimates for eddy covariance-based carbon dioxide balances using deep ensembles. Agricultural and Forest Meteorology (submitted)
- Vira ym. Agricultural fields' plant production estimation using eddy covariance and Sentinel-2 data. (in preparation)

2.5. Toteutusvaiheen arviointi

Hankkeen tavoitteena oli kehittää peltolohkokohtaista hiili- ja kasviuonekaasuarviointia käytännön eri tarpeita varten. Tavoite oli varsin laaja. Voimme todeta, että otimme merkittäviä edistysaskeleita kohti tavoitteen mukaista peltolohkokohtaista laskentaa.

Kävimme läpi olemassa olevia maatalousmaiden pitkä- ja lyhytaikaisempia mittaustuloksia Suomessa ja arvioimme mahdollisuuksia niiden käyttöön kasviuonekaasutaseita simuloivien mallien kalibrointiin ja testaukseen. Monien aineistojen osalta oli todettava, että mittauksien kattavuus ja kesto eivät tukeneet riittävällä tavalla mallien kehitystyötä. Lisäksi tyypillistä oli, että mittaukset olivat suppeita ja eri tutkimuksissa oli mitattu erilaisia parametreja hyvin eri tavoin. Maaperän hiilimittauksia sisältävissä aineistoissa, esimerkiksi, ei ollut riittävän tarkkaa kuvausta viljelykasveista ja

tehdystä toimenpiteistä, tai toisaalta agronomisiin kysymyksiin suunnitelluissa aineistoissa ei ollut mittauksia maaperästä tai kasvihuonekaasupäästöistä. Soveltuvimmat aineistot koostettiin hankkeen työpakettien käyttöön.

Simulointimallien soveltaminen alueellisissa käytännön laskennoissa osoittautui vaikeammaksi kuin ennalta arvelimme. Malleja on vaikea kalibroida niin, että ne sopisivat erilaisiin mittauksiin ja kuvaisivat vuosien ja vuodenaikojen välistä vaihtelua riittävällä tarkkuudella. Pyrimme ratkaisemaan näitä ongelmia alkamalla kehittää montaa muuta mallia yksinkertaisempaa 'SVM'-mallia tässä hankkeessa.

Hankkeessa arvioitiin myös lohko-kohtaisten hiili- ja kasvihuonekaasutaseiden laskennan tarpeita ja olemassa olevia laskentajärjestelmiä kasvihuonekaasuinventaarion ja elinkaariarvioinnin näkökulmista. Näiden osalta todettiin vielä tarpeita kehittää yhteisiä mittaus- ja laskentamenetelmiä sekä standardeja niin, että datan muodostamisen ja laskennan läpinäkyvyys taataan ja laskentaan liittyvät epävarmuudet tulevat arvioitua ja dokumentoitua. Lisäksi todettiin, että olemassa olevan datan ja aineistojen määrä on periaatteessa suuri, mutta tieto on usein sellaisessa paikassa, ettei niitä syystä tai toisesta saada mallintamisen tai muun laskennan käyttöön.

Yhteistyö hankekumppanien, Ilmatieteen laitoksen ja Luonnonvarakeskuksen, kesken sujui hyvin ja hanke tehosti olemassa olevien aineistojen yhteiskäyttöä, mallien kehitystyötä ja tulevaakin yhteistyötä.

3. Tulokset ja niiden arviointi

3.1. Tulosten esittely

Peltolohkokohtaisen laskennan menetelmät

Kehitimme **Sentinel-2-Yasso-menetelmän** peltojen hiilitaseen peltolohkokohtaiseen seurantaan (Vira ym. käsikirjoitus). Menetelmä arvioi pellon päivittäisen yhteytystuotoksen Sentinel-2 -satelliitin mittaaman lehtivihreäindeksin ja säteilyn määrän avulla. Biomassan tuotos arvioidaan laskemalla yhteen päivittäisiä yhteytysarvioita. Hiilisyöte maaperään arvioidaan vuositasolla. Se koostuu kasvien biomassatuotoksesta, josta on vähennetty pelloilta sadon mukana pois viety hiili, ja pellolle tuodusta muusta eloperäisestä aineesta. Hiilen hajoaminen maaperässä, maaperän hiilivarasto ja sen muutokset lasketaan Yasso20-mallilla kivennäismailla.

Ehdimme suunnitella Sentinel-2-Yasso -menetelmän kokonaisuuden hankkeen aikana. Ehdimme myös kuvata biomassaosan tieteellisen artikkelin käsikirjoitukseen, testata menetelmää kolmen ELY-keskuksen alueella ja verrata tuloksia nykyiseen kasvihuonekaasujen inventaarion menetelmään (Vira ym. käsikirjoitus). Seuraavaksi kuvaamme maaperän hiililaskennan toiseen tieteelliseen käsikirjoitukseen.

Kehitimme **simulointimalleihin perustuvia menetelmiä**, joilla voidaan arvioida ympäristö- ja viljelyolosuhteiden vaikutuksia peltojen hiili- ja typpioksiduulitaseisiin sekä ennustaa näitä taseita tulevaisuudessa. Simulointimalleihin perustuvia menetelmiä olivat nurmipelloille kehitetty **BASGRA-Yasso-malli** (Heimsch ym. 2024) ja turvepelloille sovitettu **LandscapeDNDC-malli** (Kajasilta ym., käsikirjoitus). Lisäksi kehitimme **BASGRA-Yasso-malliin perustuvan emulaattorin**, jonka käyttäminen ja kalibroiminen alueellisissa ja kansallisissa mittakaavoissa on alkuperäistä simulointimallia helpompaa (Aakula ym., käsikirjoitus).

Kehitimme peltojen hiili- ja vesitaseen laskentaan myös **'SVM'-mallin** yhdistämällä maaperän hiilimalli Yasson, kasvien yhteytys- ja vesitasemalli P-hydron sekä vesitalousmalli SpaFhyn (Tang ym. käsikirjoitus). Kehitimme 'SVM'-mallin ratkaistaksemme simulointimallien soveltamisen suurimpia ongelmia. Malli on täysin avoimesti dokumentoitu, ja pyrimme tekemään siitä niin yksinkertaisen kuin mahdollista.

Mittausaineistot

Hankkeessa Luke kävi läpi omia mittausaineistojaan, jotka sovittiin toimitettavaksi IL:lle TP2:n käyttöön eri mallien kehitystyöhön. Koska olemassa olevia aineistoja on paljon, kaikkia aineistoja ei voitu ottaa mukaan vaan valintaa tehtiin huomioiden kehityksen alla oleva mallit ja niiden ominaispiirteet ja edelleen yksityiskohtaiset tarpeet tarvittavalle data-aineistolle. TP2:n käyttöön valittiin lopulta Luken Valse-aineisto (vastaava tutkija Jaakko Heikkinen, Jokioinen), Luke Maaningan Anttila-kivennäispellon aineisto (vastaava tutkija Narasinha Shurpali, Maaninka) sekä Luke Ruukin NorPeat-turvepellon aineisto (vastaava tutkija Maarit Liimatainen, Ruukki). Aineistoja läpi käydessä saatiin hyvä kuva siitä mitä kaikkea Suomessa on tutkittu ja kuinka vähän hyvälaatuisia pitkäaikaisia mittausaineistoja lopulta on olemassa mallinnuksen tarpeisiin. Aineistoja läpikäydessä konkretisoitui myös kuinka paljon on vielä asioita, joita on mitattu vähän tai ei juuri lainkaan mikä asettaa omat haasteensa sille että eri toimenpiteille voitaisiin toteuttaa peltolohkokohtaista laskentaa. Hankkeessa tarkasteltiin erityisesti **pitkäaikaisia aineistoja**, joilla mallien kehitystyötä saadaan tehtyä tehokkaimmin, mutta

lyhytkestoisimmilla aineistoilla on arvoa myös sillä niiden avulla voidaan testata esimerkiksi mallien toimivuutta suppeammalla datan määrällä.

Kokosimme Ilmatieteen laitoksen ja Helsingin yliopiston **hiilidioksidin ja typpioksiduulin pyörrekovarianssimittaukset** viideltä pellolta IL:n laskentajärjestelmään ja sen Pelto-observatorioon (Vira ym. käsikirjoitus). Kasvihuonekaasumittaukset, satelliittimittaukset ja muut mittaukset tutkimuspelloilta päivittyvät Pelto-observatorioon lähes reaaliajassa. Mittauksia on nyt yhteensä noin 20 vuotta, ja uusia mittauksia kertyy järjestelmään jatkuvasti automaattisesti toimivilta mittausasemilta. Pyörrekovarianssimittausten aikasarjoihin tulee katkoksia, kun menetelmä ei anna luotettavia tuloksia mikrometeorologisten olosuhteiden vuoksi. Järjestelmä paikkaa nämä katkokset automaattisesti kehittämällämme menetelmällä (Vekuri ym. 2023, käsikirjoitus).

Ohjelmoimme IL:n tietojärjestelmään **tietovirrat laskentajärjestelmien tarvitsemille syöttötiedoille**, kuten peltolohkojen koordinaateille, säätiedolle, säteilytiedolle ja satelliittitiedolle. Tässä hankkeessa laajensimme ja automatisoimme aiemmin kehittämäämme järjestelmää (Nevalainen ym. 2021).

Kasvihuonekaasulaskennan menetelmät

Kehitimme tavan, jolla Sentinel-2-Yasso -menetelmää voitaisiin käyttää **kansallisessa kasvihuonekaasujen inventaariossa**. Havainnollistimme menetelmää kolmen ELY-keskuksen alueella. Poimimme esimerkkinä neljän viljelykasvin peltoja, ja laskimme niille arviot biomassan tuotoksesta ja maaperän hiilisyötteestä Yasso-laskentaa varten.

Hankkeen aikana testattiin yhteistyössä Landscape-DNDC-mallia Luken turvepeltoaineistolla (Kajasilta ym., käsikirjoitus). LandscapeDNDC on prosessipohjainen malli, joka simuloi turpeen hajoamista sekä toisaalta maan orgaanisen aineksen muodostumista peltoon jäävästä juuri- ja versobiomassasta. Lisäksi kenttäolosuhteissa on hankkeen aikana toteutettu Luke Ruukin koeasemalla turvepellon (Gerin ym. 2023) viljelyä korotetulla pohjavesitasolla yhteistyössä IL:n kanssa. Mallinuksilla ja mittauksilla on tavoitteena selvittää voidaanko turvepelloille, joissa tehdään vesienhallintaa, saada oma alhaisempi päästökerroin. Hankkeen aikana konkretisoitui entisestään suuri tarve kehittää kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion laskentaa huomioimaan erityisesti turvepellot paremmin. Kasvihuonekaasuinventaario huomioi turvepeltojen päästöjen vähentämiseen tähtäävät toimet yhä varsin puutteellisesti, eikä toimienkaan vaikutuksia tunneta riittävän tarkasti. Erityisen tärkeää olisi saada huomioitua turvepeltojen pohjavesitaso inventaarion laskennassa ja tätä kehitystyötä on jatkettava tulevaisuudessa.

Keskustelimme **elintarvikeyritysten peltolohkokohtaisen hiiliarvioinnin** tarpeista yritysten kanssa. Keskustelimme erityisesti siitä, miten peltolohkokohtaiset arviot voitaisiin liittää heidän arvoketjuihinsa ja tuotteidensa hiilijalanjälkien arvioihin. Kehitimme palvelumallia, jossa peltolohkojen tunnuksot luettaisiin laskentajärjestelmäämme, järjestelmä kokoaisi niiden perusteella muut laskentaan tarvittavat tiedot järjestelmään ja palauttaisi hiililaskennan tulokset yritysten ympäristövaikutusten laskennan rajapintoihin tai muutoin heidän raportointinsa tarpeisiin. Laskenta uusittaisiin yrityksen tarvitsemin määräväleihin, ja se voisi olla jatkuvatoimistakin tarkimmin seurattaville pelloille. Tällaisessa palvelussa tietojen omistuksesta ja viljelijöiden yksityisyyden suojasta olisi huolehdittava asianmukaisesti.

Hiilimarkkinoiden laskennassa on hiilitaseen seurannan lisäksi tehtävä tulevaisuuden skenaarioita mm. hiilensidonnallisuuden lisäämistä ja pysyvyyttä koskevia arvioita varten. Tähän tarkoitukseen tarvitaan simulointimalleihin perustuvia menetelmiä. Paransimme niiden soveltuvuutta suomalaisten peltolohkojen hiililaskentaan tässä hankkeessa, mutta emme varsinaisesti kehittäneet hiilimarkkinoiden laskennan sovelluksia.

3.2. Tulosten vieminen käytäntöön

Hankkeessa koostetut mittausaineistot muodostavat tärkeän osan kansallista kasvihuonekaasupäästöjen data-aineistosta, jotka tukevat kansallista kasvihuonekaasuinventaarion kehitystyötä sekä kansallisten päästöarviointimenetelmien kehitystä.

Sentinel-2-Yasso -menetelmä on esimerkki vaihtoehdosta kehittää kansallista kasvihuonekaasujen arviointijärjestelmää. Elintarvikealan yritykset ovat osoittaneet kiinnostusta menetelmää kohtaan Suomessa ja ulkomailla.

Hankkeessa parannettuja ja kehitettyjä simulointimalleja voidaan käyttää arvioitaessa erilaisten viljelymenetelmien, vaihtelevien säiden ja muuttuvan ilmaston vaikutuksia hiileen ja kasvihuonekaasujen taseisiin.

3.3. Tulosten merkitys ja jatkotoimenpiteet

Hankkeessa on yhdistetty peltolohkojen hiilen ja kasvihuonekaasujen tieteellinen tutkimustyö, mittaukset ja mallitus, hyödyntämään hallinnon ja elinkeinoelämän käytännön tietotarpeita. Hankkeen työ on vertailukelpoista kansainvälisesti tehtävän työn kanssa. IL

kehittää peltojen hiilen ja kasvihuonekaasujen arviointimenetelmiä eurooppalaisena yhteistyönä ja on voinut vertailla tämän hankkeen tuloksia kansainväliseen työhön.

Hankkeen tuloksista on yhteistyössä kerrottu MMM:n kansliapäällikölle, valtiosihteerille ja muille viranhaltijoille, ja tästä esittelystä saatiin kutsu keskustella tuloksista ja jatkotoimenpiteistä ministeriössä.

Hankkeen aikana tehdyn olemassa olevien aineiston kartoitus alleviivasi tarpeen harmonisoida ja standardoida kasvihuonekaasupäästöjen ja hiilitasearvioiden mittaukset ja määrytykset. Kenttämittausten ja näytteenoton toteuttaminen on resurssi-intensiivistä, minkä vuoksi on erityisen tärkeää harmonisoida mittaus-, analyysi- ja laskentamenetelmiä, jotta aineistoista saadaan mahdollisimman paljon irti ja niistä voidaan muodostaa esimerkiksi meta-aineistoja mallinnuksen tueksi ja että ennen kaikkea aineistot olisivat keskenään yhteismitallisia. Mittausten ja datan määrä on kasvanut vuosien varrella huomattavasti minkä vuoksi olisi tärkeää, että datan käsittely ja datan hallinta olisi järjestelmällistä ja suunnitelmallisempaa, jotta datan jakaminen ja datan avoimuus toteutuisi paremmin. Tämä vaatii investointeja datan hallintajärjestelmiin.

Jos pyritään kohti peltolohko- ja toimenpidekohtaista kasvihuonelaskentaa, tärkeintä olisi lisätä aineistoja ja tietoa eri toimenpiteistä ja niiden vaikutuksista. Tällä hetkellä on vielä paljon toimenpiteitä, joita ei ole mitattu riittävän paljon esimerkiksi eri maalajeilla, eri puolilla Suomea tai erilaisilla viljelytekniikoilla, jotta näitä toimenpiteitä voitaisiin viedä eteenpäin. Luken [Luonnonvaratieto-verkkosivuilla Tiedettä ja Tietoa](#) -osiossa on koottuna yhteen Suomessa mitattujen maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen julkaistut vertaisarvioidut tieteelliset artikkelit. Sen sisältöä ja visuaalista ulkonäköä on tarkoitus kehittää ja tavoitteena on, että sieltä pystyisi helposti katsomaan missä päin Suomea on mitattu, millä menetelmillä ja mitkä ovat olleet kunkin tutkimuksen päätulokset. Sivuston toivotaan tulevaisuudessa olevan paikka missä näkyy tieteellinen pohja eri toimenpiteille ja niiden vaikutuksille kun pyritään kohti kestävästä maataloutta. Tällä hetkellä mittausaineistoja on vielä paljon, jotka ovat vasta tulossa julkaisuun ja tietopohja täten kasvaa koko ajan.

Hankkeen tuloksia hyödynnetään kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion kehittämisessä. Lupaava lähestymistapa on Sentinel-2-Yasso-menetelmä. IL kehittää myös tähän menetelmään perustuvia hiilen laskentapalveluja suomalaisille elintarvikealan yrityksille sekä keskustelee vastaavasta palvelukehityksestä ulkomaalaisten yritysten kanssa. Esiin nousi myös tarve kansallisten mittausaineistojen jatkojalostamiselle inventaarion ja muiden sovellusten tueksi. Tämä olisi erityisen tärkeää muun muassa

turvepelloilla, jotka ovat kansallisesti merkittävä päästölähde. Tämä vaatisi tulevaisuudessa erityisesti pohjavesitason huomioon ottavien menetelmien kehittämistä.

4. Toimintasuositukset ja hankkeen muut tuotokset

Hankkeen keskeiset tulokset on esitelty seuraavassa Toimintasuositukset -liitteessä: [Kohti peltolohkokohtaista laskentajärjestelmää](#).

Hankkeessa saatuja tuloksia esiteltiin myös laajasti maatalouteen ja maatalouden ilmastovaikutuksiin keskittyvien tutkimushankkeiden yhteisessä tulostilaisuudessa 3. lokakuuta 2024: **Hiilijalanjäljestä hiilikädenjälkeen – uusia tutkimustuloksia maanviljelyn ilmastovaikutuksista**. Paikalle saapui noin 90 osallistujaa, mukaan lukien tutkijoita, yrityksiä, viljelijöitä ja päätöksentekijöitä.

Tapahtuman järjestäjätahoina toimivat Baltic Sea Action Group, Ilmatieteen laitos, Luonnonvarakeskus, Helsingin yliopisto ja HKFoods Oyj. Tuloksia esiteltiin seuraavista Carbon Action ja Hiilestä kiinni hankkeista: LOHKO-KHK, Stn MULTA (Maanviljelyn monihyötyiset ratkaisut ilmastokestävään ruokajärjestelmään), FF2DH (From Footprints to Digital Handprints – Carbon and greenhouse gas budget of agriculture) ja ORMINURMI (Orgaanisten ja mineraalimaiden ilmastovaikutukset nurmituotannossa). Esitysmateriaali on julkaistu tapahtuman [kotisivuilla](#), ja tapahtumasta julkaistiin myös uutinen BSAG:n sivuilla: [Maatalouden päästöjä voi vähentää uhraamatta viljelijän taloutta](#).