

Ennallistamisasetus

Orgaanisen hiilen määrä kivennäismaasta olevassa viljelysmaassa

Luonnonvarakeskus, 19.12.2024

Jaakko Heikkinen, Helena Soinne, Juha Mikola

Seuranta:

- *Seurataanko indikaattoria nykyisin?*
- *Mitkä ovat nykyisen seurannan vastuutahot, rahoitus ja toteutuksen aikaväli?*
- *Eroaako nykyinen seuranta asetuksen vaatimasta seurannasta?*
- *Nykyisen ja asetuksen mukaisen seurantamenetelmän epävarmuudet ja vaihteluvälit?*
- *Onko uutta seuranta tarpeen perustaa tai nykyistä kehittää, jos indikaattori valitaan ennallistamisasetukseen? Rahoitustarpeet ja toteuttaja?*

Ennallistamisasetuksessa orgaanisen hiilen määrä kivennäismaata olevassa viljelysmaassa on määritelty kuvaavan hiilen määrää 0–30 cm kerroksessa (tn C/ha). Asetustekstissä ohjeistetaan käyttämään IPCC:n (2006) menetelmiä, mihin myös kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion laskelmat perustuvat. Asetustekstissä mainitaan myös eurooppalaisen Lucas Soil aineiston (Jones ym 2021) hyödyntäminen, mutta asetuksessa ei määritellä yksiselitteisesti, millä tavoin Lucas Soil aineistoa tulisi asetuksen yhteydessä käyttää.

Ennallistamisasetuksessa mainittua hiilen määrää suomalaisilla kivennäismaapelloilla seurataan sekä kansallisessa seurantatutkimuksessa (Heikkinen ym. 2013; 2022) että eurooppalaisessa LUCAS Soil -seurannassa (Heikkinen ym. 2024). Kansallinen maaperäseuranta on toteutettu vuosina 1974, 1987, 1998, 2009 ja 2018. Vuonna 2018 seurantaverkostoon kuuluvien näytealojen lukumäärä oli 620 (Kuva 1). Seurannan toteuttaa Luonnonvarakeskus. Seuraava näytteenottokierros on suunniteltu toteutettavaksi vuonna 2028. Kansallinen peltomaiden maaperäseuranta sisältyy maa- ja metsätalousministeriön rahoittamiin Luonnonvarakeskuksen viranomais- ja asiantuntijapalveluihin (VOAS) osana maatalousympäristöjen seurantakokonaisuutta.

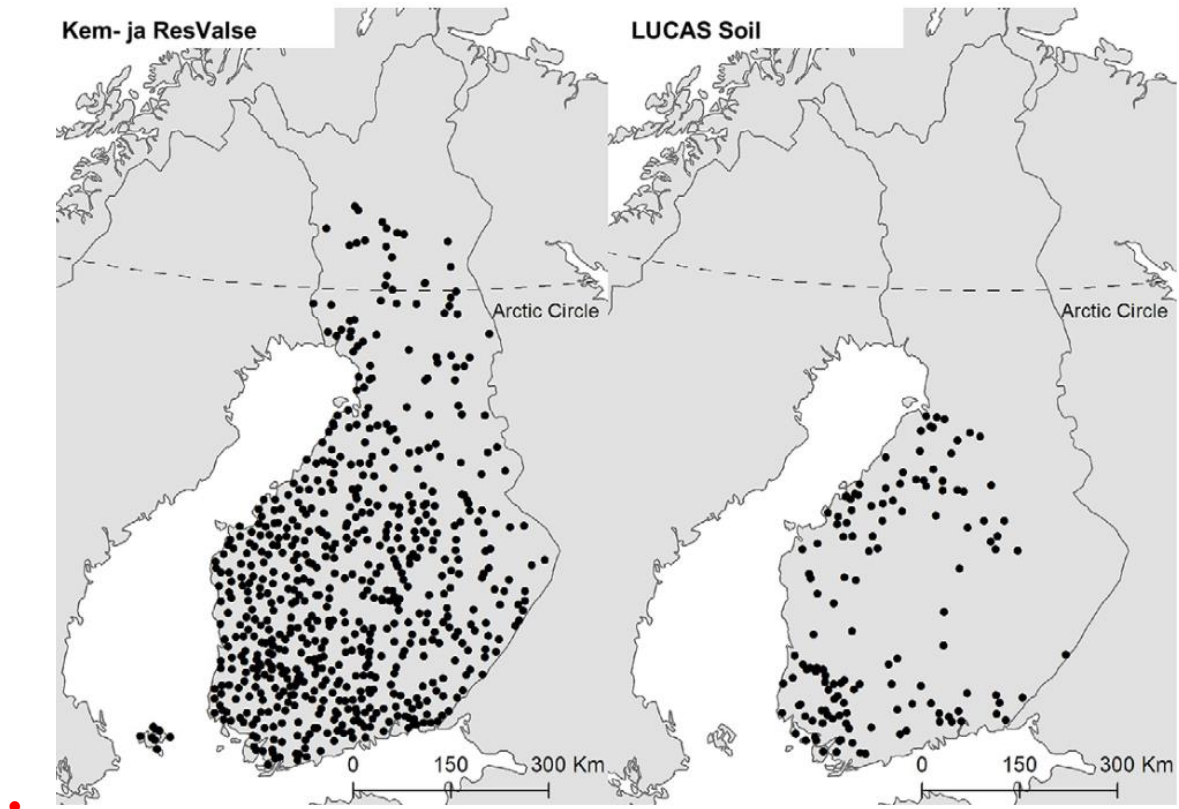
Kansallisessa seurantatutkimuksessa otetaan käytännön peltoviljelmillä sijaitsevilta aarin kokoisilta näytealoilta kokoomanäyte 0–15 cm syvyydestä. Tuoreimmalla viidennellä seurantakerroksella (2018) perustettiin 150 uutta näytealaa. Hiilivarastoarvion tarkentamiseksi uusilta näytealoilta otettiin seurantanäytteen lisäksi kerroksellisia maanäytteitä ulottuen 40 cm syvyyteen (0–5 cm, 5–15 cm, 15–25 cm ja 25–40 cm).

Nykyinen seuranta toteutetaan noin kymmenen vuoden välein, mikä on harvemmin kuin ennallistamisasetuksessa mainittu kuuden vuoden seurantaväli. Ennallistamisasetuksessa määritelty 30 cm maakerros on lisäksi paksumpi kuin pitkäaikaisseurannassa käytetty 0–15 cm kerros. Sen sijaan uusilta 150 koealalta vuonna 2018 otetut kerrosmaanäytteet vastaavat hyvin ennallistamisasetuksen määritelmää kerrospaksuuden osalta. Vaikka näytteenotossa käytetyt

kerrosrajat eivät täysin vastaa ennallistamisasetuksen määrittämää 30 cm syvyyttä, tulokset voidaan hyvin laskea vastaamaan 30 cm maakerrosta. Ajallisesti seuraava suunniteltu näytteenottokierros vuonna 2028 vastaa hyvin ennallistamisasetuksen vuoden 2030 tarkasteluajankohtaa. Siihen mennessä seurantatutkimuksen näytteenotto sekä näytteiden ja tulosten analysointi tulisi olla valmiina.

Ennallistamisasetuksen mukainen tiheämpi seurantaväli sekä mahdollinen kerroksellisen näytteenoton laajentaminen nykyistä suuremmalle näytealajoukolle lisäävät seurantakustannuksia. Ennallistamisasetuksessa jäi lisäksi epäselväksi, seurataanko indikaattorilla koko Suomen peltojen keskimääräistä muutosta vai erityisesti niiden kohteiden muutosta, joille on tehty ennallistamistoimenpiteitä. Nykyinen kansallinen maaperäseuranta on riittävä tilastollisesti merkitsevien hiilivaraston muutosten havaitsemiseen koko maan tasolla (Heikkinen ym. 2013; 2024). Lisäksi aineisto on tarpeeksi laaja esimerkiksi viljelykiertomuutosten vaikutusten arvioimiseen karkealla luokittelulla (Kostensalo ym. 2024) tai ilmastonmuutoksen vaikutuksen tarkasteluun maaperän hiilipitoisuuteen (Heikkinen ym. 2022).

Kansallisen maaperäseurannan lisäksi peltomaiden hiilen määrää seurataan eurooppalaisen LUCAS Soil -näytteenoton avulla. Näytteenotto on toteutettu vuosina 2009, 2015 ja 2018, ja näytteet otetaan 0–20 cm maakerroksesta. Suomessa LUCAS Soil -näytealoja on peltomailla 134 (Kuva 1). LUCAS Soil -seuranta toteutetaan kaikissa Euroopan maissa yhtenäisin menetelmin, mikä mahdollistaa luotettavan kuvan saamisen hiilen määrän alueellisesta vaihtelusta Euroopan sisällä. Ajallisten trendien havaitsemiseen aineisto ei kuitenkaan ole paras mahdollinen, sillä näytealoja on kohtuullisen vähän suomalaisilla peltomailla, ja mittaustulokset vaihtelevat huomattavasti näytteenottokertojen välillä (Heikkinen ym. 2024). Tuoreimmalla näytteenottokerralla 2022, josta tuloksia ei ole vielä saatavilla, näytteenottosyvyys on ulotettu 30 cm:iin (Jones ym 2021), joten tältä osin Lucas Soil aineisto palvelee aikaisempaa paremmin ennallistamisasetuksen tavoitteita.



KUVA 1. Kansallisen peltomaiden kemiallisen tilan seurannan (Valse) ja eurooppalaisen LUCAS Soil näytealojen sijainti. Kuva poimittu Haaviston (2023) julkaisusta.

Maaperäseurantojen lisäksi maaperän hiilen määrän kehitystä arvioidaan vuosittain toteutettavassa kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariossa (KHK-inventaario) (Tilastokeskus 2024). Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (LULUCF) -sektorin sekä maataloussektorin päästöarvioinnin toteuttaa Luonnonvarakeskus. KHK-inventaariossa kivennäismaiden maaperän hiilen määrän muutokset arvioidaan mallintamalla käyttäen Yasso07-maaperän hiilimallia (Tuomi ym 2009). Laskennassa huomioidaan kasvintähteistä ja kotieläinten lannasta maahan päätyvän hiilen määrä ja laatu sekä ilmasto-olosuhteista (lämpötila ja sademäärä) riippuva orgaanisen aineksen hajoaminen ja siitä johtuva hiilen hävikki. Kasvintähteistä peräisin oleva hiili arvioidaan satotilastojen (Luke tilastot) ja viljelypinta-alojen (Ruokavirasto) perusteella. Lannan mukana pelloille päätyvä hiilen määrä arvioidaan puolestaan kotieläinten lukumäärän perusteella (Luke tilastot) ja eläinlajikohtaisten lannantuottokertoimien avulla. Mallinuksessa käytetyt ilmastomuuttujat lasketaan Ilmatieteenlaitoksen hila-aineistosta. KHK-inventaariossa vuosittaiset hiilivarastomuutokset raportoidaan vuodesta 1990 lähtien. Mallinnus tehdään erikseen Etelä- ja Pohjois-Suomelle. Maaperän hiilivarastomuutosten epävarmuuden on arvioitu vaihtelevan -69 % ja 137 % välillä (Tilastokeskus 2024, Annex 2), mutta tämä epävarmuusarvio sisältää myös turvepellot. Mallinnus tehdään Yasso07- mallilla, jonka tuottamat arviot kuvastavat maan kokonaishiilimäärää (noin 1 m syvyydestä maakerrosta). Kerrospaksuuden osalta nykyisen KHK-inventaarion tulokset eivät ole siis täysin yhdenmukaisia ennallistamisasetuksen kanssa, joskin

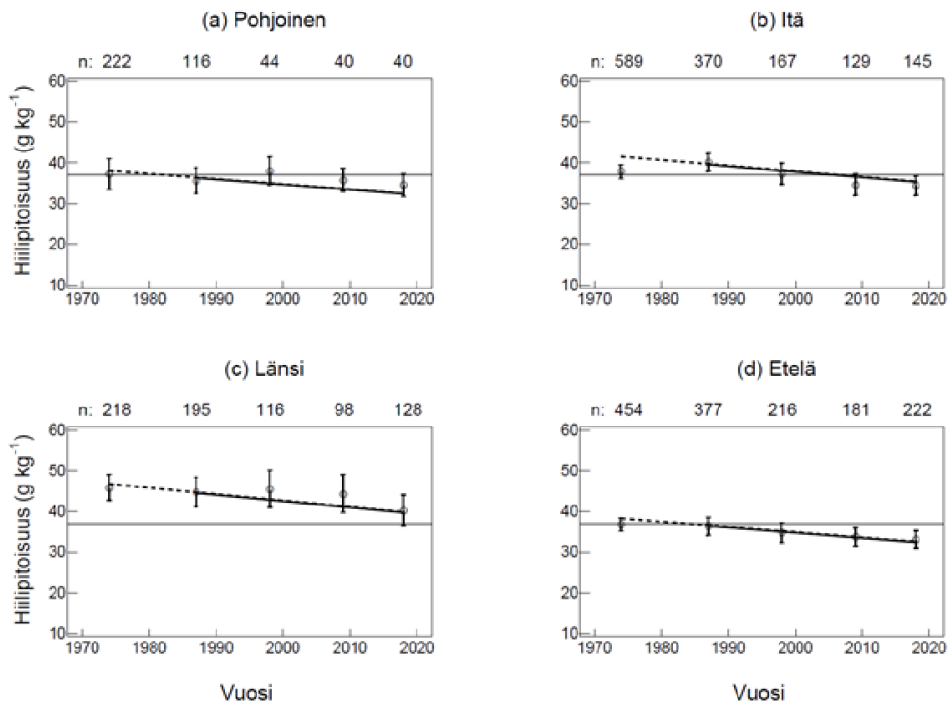
valtaosa hiilestä on varastoitunut maan pintakerrokseen (ks. Palosuo ym 2015, Supplement). Suomessa käytettävä laskentamenetelmä vastaa Tier3-tason laskentaa. Maaperän hiilen osalta IPCC:n ohjeet (2006) eivät määrittele tiukasti millä tavoin Tier3-tason laskennat on toteutettava vaan laskentamenetelmät vaihtelevat maittain. Käytössä on eri maaperän hiilimalleja, mutta päästöarviot voivat perustua myös maaperänäytteenottoon. Jos ennallistamisasetuksen edellyttämä arvio orgaanisen hiilen määrästä perustuisi KHK-inventaarion tuloksiin, maaperäseurantojen aineistoja voisi lähinnä hyödyntää tulosten validoinnissa.

Indikaattorin nykytilanne ja viimeaikainen kehitys:

Suomalaisiin kivennäismaapeltoihin on varastoitunut paljon hiiltä. Keskimäärin kivennäismaapelloilla on hiiltä 8.4–9.8 kg/m² (0–30 cm) riippuen maalajista ja pellon viljelyhistoriasta (Heikkinen ym. 2021), mikä on huomattavasti enemmän kuin Keski- tai Etelä-Euroopassa: esim. Belgia 5.0 kg/m² (Meersmans ym 2011), Italia 5.1 kg /m² (Chiti ym 2012), Ranska 4.9 kg/m² (Martin ym 2010)). Hienojakoisissa maissa hiilivarasto on suurempi kuin karkeammilla maalajeilla. Maahan sitoutuneen hiilen määrä vaihtelee kuitenkin huomattavasti peltolohkojen välillä. Myös peltolohkon sisällä hiilen määrän vaihtelu on suurta (Heikkinen ym. 2021).

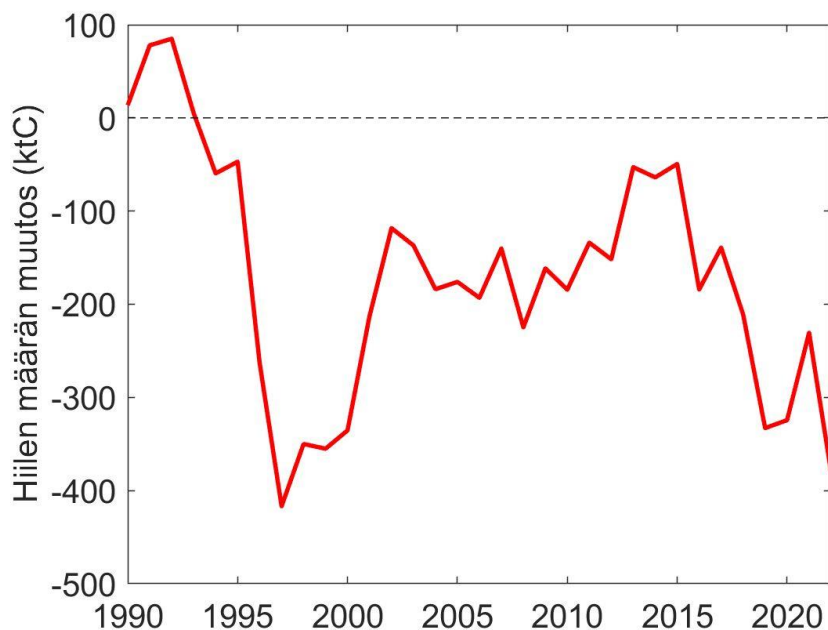
Maaperäseurannan perusteella kivennäismaapeltojen hiilen määrä on vähentynyt tasaisesti seurantaverkoston perustamisesta lähtien. Vuosittainen hiilipitoisuuden lasku oli kaudella 1987–2018 noin 0,4 % (Heikkinen ym. 2013; Yli-Viikari 2019) (Kuva 2) ja jatkui samansuuruisena vuosina 2009-2018 (Heikkinen ym. 2024). Maaperän hiilen määrän muutoksiin vaikuttavat useat tekijät, joista tärkeimpiä ovat pellon historiallinen maankäyttö, viljelytoimet ja ilmaston muuttuminen (Heikkinen ym. 2022).

Historiallisen maankäytön osalta Heikkisen ym. (2022) tulokset osoittavat, että turvepelloista kivennäismaiksi muuttuneet pellot menettävät huomattavasti keskimääräistä enemmän hiiltä. Pitkään viljelyssä olleilla pelloilla muutokset sen sijaan ovat pieniä. Tutkimus vahvistaa käsitystä, että nurmien hiilitase on yksivuotisia kasveja parempi. Tulokset antoivat viitteitä myös monipuolisen viljelykierron hiiltä kerryttävästä vaikutuksesta. Ilmaston muuttumisen osoitettiin johtavan hiilen häviämiseen maasta.



KUVA 2. Kivennäismaiden (OM<20%) hiilipitoisuuden muutosta kuvaavat mallit sekä keskimääräiset hiilipitoisuudet 95% luottamusväleinen vuosien 1987-2018 näytteenottojen perusteella. Kuva on poimittu Yli-Viikarin (2019) julkaisusta.

KHK-inventaariossa raportoidut kivennäismaapeltojen hiilivaraston muutokset ovat samansuuntaisia kuin maaperäseurannan havainnot. Lukuun ottamatta yksittäisiä vuosia raportointikauden alkupuolella, maaperä on ollut pysyvästi hiilen lähde (Kuva 3). Etelä-Suomessa, missä suurin osa peltomaista on, hehtaariohtaiset päästöt ovat vaihdelleet nollan ja noin 200 kg välillä (Tilastokeskus 2024, Table 3_App_6j). Inventaarion tuloksille ei ole tehty kattavaa herkkyystarkastelua, joka mahdollistaisi luotettavan arvioinnin tärkeimmistä muutosten taustalla vaikuttavista tekijöistä. Erinäiset KHK-inventaarion menetelmin lasketut tulevaisuusskenaariot (Lehtonen ym. 2021) osoittavat kuitenkin, että viljelytoimilla voidaan merkittävästi vaikuttaa maaperän hiilen määrään, mutta samaan aikaan ilmaston muuttuminen tekee hiilen lisäämisestä entistä vaikeampaa.



KUVA 3. Kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariorissa raportoitu peltomaiden hiilen määrän muutos (ktC) kivennäismailla. Kuva esittää kokonaishiilivarastossa tapahtuneen muutoksen, ja koostuu sekä hehtaarikohtaisista päästökertoimien että peltopinta-alan muutoksista.

Arvio indikaattorin käyttökelpoisuudesta ja tarkoituksenmukaisuudesta:

- *Sopiiko asetuksessa kuvattu indikaattori Suomen olosuhteisiin?*
- *Mitä orgaanisen hiilen varaston muutoksista voidaan päätellä?*
- *Miten indikaattori kuvaa monimuotoisuuden edistämiseksi tehtävien toimien etenemistä maatalousympäristöissä?*
- *Kuvaako indikaattori mielekkäällä tavalla maatalousympäristössä tapahtuvia muutoksia?*

Maaperän hiilen määrä on monessa mielessä hyvä indikaattori maatalousympäristön tilasta. Maaperä on valtava hiilenvarasto ja muutokset hiilen määrässä vaikuttavat suoraan yhteen ennallistamisasetuksen päätavoitteeseen, ilmastonmuutoksen hillintään ja siihen sopeutumiseen. Lisäksi orgaanisella aineksella on merkittävä rooli useissa maaperän prosesseissa, jotka tukevat maaperän toimintoja ja ekosysteemipalveluja (Hoffland ym. 2020). Orgaaninen aines parantaa maan mururakenteen kestävyyttä auttaen näin eroosion hillinnässä ja tarjoten samalla suojaa ja heterogeenisen elinympäristön maaperän eliöille. Orgaaninen aines myös tukee ravinteiden kiertoja, ja pidättää sekä vapauttaa ravinteita kasveille ja eliöille. Orgaaninen aines pidättää myös vettä ja edistää isojen huokosten muodostumista lisäten näin veden imeytymistä maahan. Orgaanisen aineksen suhteellinen merkitys edellä mainituissa maaperän prosesseissa ja toiminnoissa (eroosion torjunta, elinympäristön tarjoaminen, ravinteiden kierot ja vedenpidätys) riippuu maalajista. Savimaissa korostuu mururakenteen ja kaasunvaihtoa tukevan huokosrakenteen muodostuminen (Soinne ym. 2016, Soinne ym. 2023),

mutta orgaanisen aineksen merkitys ravinteiden pidättymisessä tai vedenpidätyskyvyssä on savimailla melko pieni (Minasny ja McBratney, 2018; Soinne ym., 2023). Karkeissa kivennäismaissa orgaanisella aineksella on suurempi merkitys ravinteiden pidätyksessä (Räty ym. 2021; Soinne ym. 2021) ja vedenpidätyskyvyssä (Minasny ja McBratney, 2018). Orgaaninen aines vaikuttaa suoraan myös maassa elävien eliöiden monimuotoisuuteen (Bastida ym. 2021).

Maaperäseurannassa kerätään hiilen lisäksi tietoa maan ravinnetilasta, raskasmetalleista ja happamuudesta (Keskinen ym. 2016; Soinne ym. 2022). Tuoreimmalla näytteenottokierroksella vuonna 2018 seurattaviin muuttujiin lisättiin myös DNA-menetelmään perustuva maan mikrobilajiston määrittäminen (BioValse, julkaisu tekeillä) sekä torjunta-ainejäämien määrittäminen (PesResValse, Hagner ym. 2024). Ruokaviraston aineistoista on lisäksi mahdollista hakea kattavasti peltolohkokohtaista tietoa viljelykasveista, kerääjäkasvien käytöstä ja tilan tuotantosuunnasta. Maaperäseurannan eri osatutkimusten lisäksi saatavilla oleva laaja peltolohkokohtainen taustatieto mahdollistaa maan hiilen määrän ja biodiversiteetin yhteyden selvittämisen, sekä toimenpiteiden vaikutuksien arvioimisen.

Ennallistamisasetuksen indikaattorin määrittely, hiilen määrää 0–30 cm maakerroksessa (tn C/ha), viittaisi vakiosyvyysmenetelmän (fixed-depth method, FD) käyttöön hiilivaraston muutosten arvioinnissa. Hiilivaraston arvioinnissa on kuitenkin suositeltavaa käyttää vakiomassamenetelmää (equivalent soil-mass method, ESM) (Ellert & Bettany 1995; Heikkinen ym. 2021), jolla saadut tulokset voidaan muuntaa vastaamaan noin 30 cm syvyistä maakerrosta.

EU:lla on valmisteilla maaperän seuranta koskeva lakiesitys (Soil Monitoring Law), jossa ennallistamisasetuksen tavoitin on maaperän hiileen liittyviä seurantavaatimuksia. Lakiesityksessä hiilen hävikin indikaattoriksi on esitetty hiili/saves -suhdetta ja tämän indikaattorin osalta terveessä maassa suhteen tulisi olla raja-arvoa 1/13 suurempi. Kansallista maaperäseuranta voitaisiin mahdollisesti sovittaa niin, että se samanaikaisesti tukisi sekä EU:n ennallistamisasetuksen että valmisteilla olevan maaperäseuranta koskevan lakiesityksen tavoitteita. Näytteenottoväliä voisi lyhentää nykyisestä noin kymmenestä vuodesta, minkä lisäksi esimerkiksi uusien koealojen sijoittelussa ja näytteenoton kerrosrajojen valinnassa voisi paremmin huomioida ennallistamisasetuksen ja tulevan lakiesityksen vaatimukset.

Trendi:

- *Alustava arvio siitä, onko kansallisella tasolla mahdollista kasvattaa indikaattorin arvoa TAI pitää nykyistä tasoa vuoteen 2030 mennessä?*
- *Onko muutoksia mahdollista havaita ennallistamisasetuksen edellyttämän seuranta-aikataulun aikana, koska maaperässä tapahtuvat muutokset ovat verrattain hitaita?*
- *Onko olemassa maatalouden toimenpiteitä, joilla indikaattoriin voidaan vaikuttaa? Minkä mittaluokan muutoksia trendin kasvattaminen vaatisi maataloustuotantoon?*
- *Kuinka suuri varmuus on siitä, että kyseiset toimenpiteet kasvattaisivat indikaattorin arvoa?*

- *Miten ilmastonmuutos vaikuttaa indikaattorin arvon kehittymiseen tulevaisuudessa?*

Tulevaisuuden trendi kivennäismaapeltojen hiilen määrässä riippuu paitsi maaperän todellisista muutoksista, myös siitä, miten kivennäismaa määritellään ennallistamisasetuksessa. Jos kivennäismaat määritellään pelkästään orgaanisen aineen määrän tai paksuuden perusteella (kuten Kuvassa 2), on melko varmaa, että hiilenmäärän laskeva trendi jatkuu. Tällöin aineistoon sisältyy turvemaista kivennäismaiksi muuttuneita maita, joilta hiiltä häviää tavanomaista enemmän, mikä on merkittävä syy hiilen keskimääräisen määrän vähenemiseen. Jos ennallistamisasetuksen puitteissa kivennäismaat voidaan rajata vain sellaisiin alueisiin, jotka ovat aina täyttäneet kivennäismaiden määritelmän, mahdollisuudet indikaattorin arvon kasvattamiseen paranevat. Kansallisen maaperäseurannan pintamaanäytteiden (0–15 cm) osalta rajaamiseen voisi hyödyntää aikaisempien, vuodesta 1974 alkavien näytteenottojen mittaustuloksia. Uusien koealojen osalta rajaaminen ei ole yksiselitteistä, mutta mahdollisesti apuna voisi käyttää historiallisia kartta-aineistoja.

Kansallisen maaperäseurannan näytteenottoverkoston riittävyttä on arvioitu ainoastaan pintamaan (0–15 cm) näytteiden perusteella: 620 koealan verkosto on todettu riittäväksi sekä tilastollisesti merkitsevien keskimääräisten hiilivaraston muutosten havaitsemiseen koko maan tasolla että hiilen määrään vaikuttavien tekijöiden arvioimiseen. Ennallistamisasetuksessa käytetään kuitenkin 30 cm syvyisen maakerroksen hiilivarastoa, minkä vuoksi arviot hiilivaraston muutoksista tulisi perustaa vuonna 2018 aloitettuun 150 koealan kerrokselliseen näytteenottoon (Heikkinen ym. 2021). Kerroksellinen näytteenotto on tähän mennessä toteutettu vain kerran, joten sen perusteella ei voida tehdä tarkkaa arviota näytteenoton riittävydestä ennallistamisasetuksen vaatimuksiin. Näytteenotto on kuitenkin suunniteltu nimenomaan maaperän hiilivaraston muutosten luotettavaan arviointiin, joten on oletettavaa, että muutoksia voidaan havaita suppeammallakin koealaverkostolla.

Kivennäismaiden hiilitaseeseen voidaan vaikuttaa joko lisäämällä maahan päätyvän hiilen määrää tai hidastamalla hiilen hajoamista maaperässä. Hiilisyötteen lisäämiseen tähtäviä toimia ovat kerääjä- ja aluskasvien viljely, nurmivaltaisen ja monipuolisen viljelykierron suosiminen sekä maanparannusaineiden käyttö. Hiilisyötettä voidaan lisätä myös parantamalla pellon kasvukuntoa esimerkiksi ojituksen tai kalkituksen avulla sekä optimoidulla lannoituksella. Hiilen hajoamista voidaan puolestaan hidastaa vähentämällä maanmuokkausta, jos muokkauksen vähentäminen ei vaikuta heikentävästi maan sadontuottokykyyn. Ilmaston lämpeneminen kiihdyttää orgaanisen aineksen hajotusta, jolloin hajoamisen vähentämisestä tulee yhä haastavampaa. Hiilen määrän vaikuttavia tekijöitä on kuvattu tarkemmin Lehtosen ym. (2021) tuottamassa yhteenvetoraportissa.

Maaperän kyky varastoida hiiltä riippuu maaperän ominaisuuksista ja ilmastosta (Wiesmeier ym. 2019) ja mitä korkeampi maan hiilipitoisuus on, sitä haastavampaa hiiltä on kerryttää lisää (Paul ym. 2023). Yleisesti ottaen hiilen kerrytys onnistuu todennäköisimmin alueilla, joilla hiilen hävikki on ollut huomattavaa tai joissa hiilisyötettä voidaan selvästi lisätä tekemällä perusparannuksia maan kasvukuntoon (Sanderman ym., 2017; Amelung ym., 2020). Suomen kivennäismaapeltojen hiilipitoisuudet ovat melko korkeita ja erityisesti karkeilla kivennäismailla hiilipitoisuuden kasvattaminen voi olla haasteellista (Soinne ym. 2024; Lehtonen ym. 2021).

Viljely on Suomessa monessa suhteessa kehittynyt hiiltä kerryttävään suuntaan. Viljelykierrot ovat laaja-alaisesti monipuolistuneet ja monivuotisella nurmella oleva viljelyala on kasvanut. Viljelykiertomuutosten hiilen määrää lisäävä vaikutus on myös nähtävissä maaperäseurannan tuloksista (Heikkinen ym. 2022, Kostensalo ym. 2024). Samaan aikaan kerääjäkasvien käyttö on lisääntynyt ja viljakasvien osalta on siirrytty syysmuotisten lajien suuntaan (Luke tilastot), mikä pitää maan ympärivuotisesti kasvipeitteisenä.

Pohjois-Euroopassa kesän (touko-syyskuu) lämpötilan odotetaan nousevan 2041–2060 mennessä noin 1,5–3 °C verrattuna vuosien 1981–2010 ajanjaksoon riippuen käytetystä ilmastoskenaariosta (Gutiérrez et al., 2021). Vastaavasti sademäärän ennustetaan kasvavan jopa 10 % (Gutiérrez et al., 2021). Ilmastonmuutos voi vaikuttaa maan orgaanisen aineksen määrään joko lisäävästi tai vähentävästi riippuen siitä, missä määrin ilmastonmuutoksen seurauksena maaperään päätyvien kasvintähteiden määrän lisääntyminen tasapainottaa nopeammasta hajoamisesta johtuvaa hiilen hävikkiä. Sekä maaperäseuranta-aineiston (Heikkinen ym. 2022), että mallinnustulosten (Tao ym. 2023) perusteella näyttäisi, että ilmastonmuutos johtaa hiilen häviämiseen maasta, mikä vaikeuttaa ennallistamisasetuksessa asetettujen tavoitteiden saavuttamista.

Lehtosen ym. (2021) raportissa on esitetty viljelytoimien vaikutuksia maan hiilivarastoon käyttäen KHK-inventaarion kanssa yhdenmukaisia laskentamenetelmiä. Raportin perusteella ilmastonmuutos johtaa hiilen hävikkiin maasta. Maaperän hiilen väheneminen on mahdollista kääntää hiilinieluksi, mutta tämä vaatii useiden hiilisyötettä lisäävien toimenpiteiden laaja-alaista käyttöönottoa: kerääjäkasvipinta-alan lisäämistä, laajempaa viherlannoitus- ja biokaasunurmien käyttöönottoa osana viljelykiertoa sekä peltojen tuottavuuden lisäämistä yhdessä parannettujen nurmenhoitokäytäntöjen kanssa. KHK-inventaarion laskentamenetelmiä on käytetty myös MTK:n maatalouden ilmastotiekartassa (Lehtonen ym. 2020), jossa arvioitiin erilaisten ruuantuotannon kehityskulkujen vaikutuksia maan hiilivarastoon. Tiekartassa kunnianhimoinen, mutta realistinen skenaario, jossa kerääjäkasvi- ja nurmiala lisääntyivät voimakkaasti, riitti kääntämään kivennäismaapellot hiilen lähteestä hiilen nieluksi.

Tyydyttävä taso:

- *Millä perusteilla ja mitä kriteereitä käyttäen tyydyttävä taso voitaisiin määrittää maan hiilipitoisuudelle?*

Seuranta-aineiston avulla voidaan määrittää keskimääräinen vuotuinen hiilivarastonmuutos ja arvioida siihen liittyvä epävarmuus. Jos tämä arvio on riittävän tarkka ennallistamisasetuksen tavoitteiden näkökulmasta, tyydyttävänä tasona voidaan pitää tilannetta, jossa hiilivarasto ei vähene tilastollisesti merkitsevästi. Käytettäessä KHK-inventaarion tuloksia arvion pohjana, tyydyttävänä tasona voitaisiin vastaavasti pitää sitä, että mallinnettu hiilen määrän muutos ei ole negatiivinen (vrt. Kuva 3).

Ennallistamisasetuksen hengen mukaista voisi olla myös määritellä tyydyttävä taso sillä tavoin, että viljelytoimissa tapahtuvilla muutoksilla on positiivinen vaikutus peltomaan hiilen määrän.

Vaikutuksissa rajauduttaisiin siis pelkästään nykypäivän viljelytoimien vaikutuksiin ja tuloksista poistettaisiin laskevaa trendiä aiheuttavien historiallisen maankäytön (turvemaiden muuttuminen kivennäismaiksi, metsänraivaus pelloiksi) ja ilmastomuutoksen vaikutukset. Tällä tavoin tyydyttävä taso olisi helpommin saavutettavissa, mutta sen todentaminen vaatisi raskaampaa tilastollista analyysia tai mallintamista.

Kirjallisuutta:

Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., Bol, R., Collins, C., Lal, R., Leifeld, J.J.N.C. and Minasny, B., 2020. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature communications*, 11(1), p.5427.

Bastida, F., Eldridge, D. J., García, C., Kenny Png, G., Bardgett, R. D., & Delgado-Baquerizo, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal*, 15(7), 2081-2091.

Chiti, T., Gardin, L., Perugini, L., Quarantino, R., Vaccari, F. P., Miglietta, F., & Valentini, R. (2012). Soil organic carbon stock assessment for the different cropland land uses in Italy. *Biology and Fertility of Soils*, 48(1), 9–17.

Ellert, B. H., & Bettany, J. R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), 529-538.

Gutiérrez J ym (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>

Haavisto, T. (2023). Suomen maaperän seuranta, tila ja käytön ohjauskeinot.

Hagner, M., Rämö, S., Soenne, H., Nuutinen, V., Muilu-Mäkelä, R., Heikkinen, J., ... & Keskinen, R. (2024). Pesticide Residues in Boreal Arable Soils: Countrywide Study of Occurrence and Risks. Available at SSRN 4739122.

Hoffland, E., Kuyper, T.W., Comans, R.N. and Creamer, R.E., 2020. Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant and Soil*, 455, pp.1-22.

Heikkinen, J., Keskinen, R., Kostensalo, J., & Nuutinen, V. (2022). Climate change induces carbon loss of arable mineral soils in boreal conditions. *Global Change Biology*, 28(12), 3960-3973.

Heikkinen, J., Keskinen, R., Regina, K., Honkanen, H., & Nuutinen, V. (2021). Estimation of carbon stocks in boreal cropland soils-methodological considerations. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 934-945.

Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V., & Regina, K. (2013). Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global change biology*, 19(5), 1456-1469.

Heikkinen, J., Kostensalo, J., Keskinen, R., Soinne, H., & Nuutinen, V. (2024). Temporal trends in Finnish agricultural soils: A comparative analysis of national and LUCAS soil monitoring datasets. *European Journal of Soil Science*, 75(4), e13525.

IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

Jones, A., Fernandes-Ugalde, O., Scarpa, S., & Eiselt, B. (2021). LUCAS Soil 2022.

Keskinen, R., Ketoja, E., Heikkinen, J., Salo, T., Uusitalo, R., & Nuutinen, V. (2016). 35-year trends of acidity and soluble nutrients in cultivated soils of Finland. *Geoderma Regional*, 7(4), 376-387.

Kostensalo, J., Hyväluoma, J., Jauhiainen, L., Keskinen, R., Nuutinen, V., Peltonen-Sainio, P., & Heikkinen, J. (2024). Diversification of crop rotations and soil carbon balance: impact assessment based on national-scale monitoring data. *Carbon Management*, 15(1), 2298373.

Lehtonen, A., Aro, L., Haakana, M., Haikarainen, S., Heikkinen, J., Huuskonen, S., ... & Mäkipää, R. (2021). Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteet–Arvio päästövähennysmahdollisuuksista: Synteesiraportti.

Lehtonen, H., Saarnio, S., Rantala, J., Luostarinen, S., Maanavilja, L., Heikkinen, J., ... & Niemi, J. (2020). Maatalouden ilmastotiekartta–Tiekartta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen Suomen maataloudessa.

Martin, M. P., Watterbach, M., Smith, P., Meersmans, J., Jolivet, C., Boulonne, L., & Arrouays, D. (2010). Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences Discussions*, 7, 8409–8443.

Meersmans, J., van Wesemael, B., Goidts, E., Van Molle, M., De Baets, S., & De Ridder, F. (2011). Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960–2006. *Global Change Biology*, 17(1), 466–479.

Minasny, B. and McBratney, A.B., 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European journal of soil science*, 69(1), pp.39-47.

Palosuo, T., Heikkinen, J., & Regina, K. (2015). Method for estimating soil carbon stock changes in Finnish mineral cropland and grassland soils. *Carbon Management*, 6(5-6), 207-220.

Räty, M., Keskinen, R., Yli-Halla, M., Hyvönen, J. and Soinne, H., 2021. Estimating cation exchange capacity and clay content from agricultural soil testing data. *Agricultural and Food Science*, 30(4), pp.131-145.

Sanderman, J., Hengl, T. and Fiske, G.J., 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), pp.9575-9580.

Soinne, H., Hyväluoma, J., Ketoja, E. and Turtola, E., 2016. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils. *Soil and Tillage Research*, 158, pp.1-9.

Soinne, H., Keskinen, R., Rätty, M., Kanerva, S., Turtola, E., Kaseva, J., Nuutinen, V., Simojoki, A. and Salo, T., 2021. Soil organic carbon and clay content as deciding factors for net nitrogen mineralization and cereal yields in boreal mineral soils. *European Journal of Soil Science*, 72(4), pp.1497-1512.

Soinne, H., Keskinen, R., Tähtikarhu, M., Kuva, J. and Hyväluoma, J., 2023. Effects of organic carbon and clay contents on structure-related properties of arable soils with high clay content. *European Journal of Soil Science*, 74(5), p.e13424.

Soinne, H., Hyyrynen, M., Jokubė, M., Keskinen, R., Hyväluoma, J., Pihlainen, S., ... & Heikkinen, J. (2024). High organic carbon content constricts the potential for stable organic carbon accrual in mineral agricultural soils in Finland. *Journal of Environmental Management*, 352, 119945.

Soinne, H., Kurkilahti, M., Heikkinen, J., Euroala, M., Uusitalo, R., Nuutinen, V., & Keskinen, R. (2022). Decadal trends in soil and grain microelement concentrations indicate mainly favourable development in Finland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(5), 578-588.

Tao, F., Palosuo, T., Lehtonen, A., Heikkinen, J., & Mäkipää, R. (2023). Soil organic carbon sequestration potential for croplands in Finland over 2021–2040 under the interactive impacts of climate change and agricultural management. *Agricultural Systems*, 209, 103671.

Tilastokeskus 2024. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2022. National Inventory Document under the UNFCCC

Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., ... & Liski, J. (2009). Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, 220(23), 3362-3371.

Yli-Viikari, A. (toim.). 2019. Maaseutuohjelman (2014–2020) ympäristöarviointi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 63/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 215 s.

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N. and Wollschläger, U., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, pp.149-162.