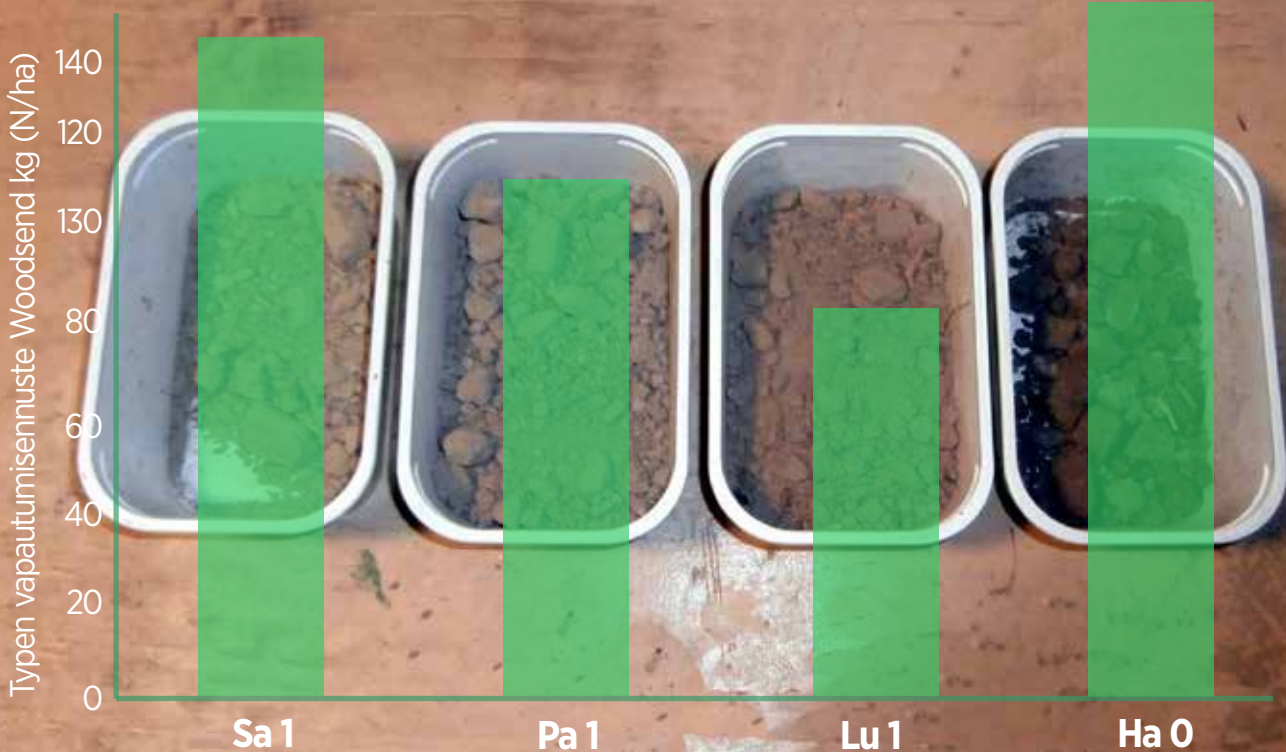




## RAPORTTEJA 188

# UUSIA MENETELMIÄ MAAPERÄSTÄ VAPAUTUVAN TYPEN MÄÄRÄN ARVIOINTIIN

OSSI KINNUNEN, TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA





# UUSIA MENETELMIÄ MAAPERÄSTÄ VAPAUTUVAN TYPEN MÄÄRÄN ARVIOINTIIN

OSSI KINNUNEN, TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA



Euroopan maaseudun  
kehittämisen maatalousrahasto:  
Eurooppa investoi maaseutualueisiin



Elinkeino-, liikenne- ja  
ympäristökeskus

PRO  
Agria



HELSINGIN YLIOPISTO  
RURALIA-INSTITUUTTI

2018

**OSMO - Osaamista ja työkaluja resurssitehokkaaseen maan kasvukunnon hoitoon yhteistyöllä  
-hanketta rahoittavat** Varsinais-Suomen ELY-keskus / Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma  
2014-2020 / Vesiensuojelun ja ravinteiden kierrätyksen erillisrahoitus, yritykset, viljelijät ja säätiöt.

## LYHENTEET JA TERMIT

**PMN:** Potentiaalisesti mineralisoitua typpi, potentiaalisesti vapautuva typpi

**WEOC:** Vesiliukoinen orgaaninen hiili, vesiliukoinen eloperäinen hiili

**WEON:** Vesiliukoinen orgaaninen typpi, vesiliukoinen eloperäinen typpi

**OC:** Orgaaninen hiili, eloperäinen hiili

**ON:** Orgaaninen typpi, eloperäinen typpi

**CMIN:** Mineralisoitua hiili, vapautuva hiili

**NMIN:** Mineralisoitua typpi, vapautuva typpi

**ANA<sub>30c</sub>:** 14 vuorokauden anaerobinen inkubaatio 30 °C:ssä eli hapellinen muhitus

**ANA<sub>40c</sub>:** 7 vuorokauden anaerobinen inkubaatio 40 °C:ssä eli hapeton muhitus

**Mineralisaatio:** eloperäisen aineksen ravinteita muuttuu pieneliöstön hajotustoiminnan tuloksena kivennäisravinteiksi ja hiili vapautuu hiilidioksidina hajottajaeliöstön hengityksen seurauksena

**Vapautuminen:** ravinteita vapautuu mineralisaatiossa, vaihtopinnoilta tai rapautumisessa

**Rapautuminen:** maaperän kivennäisaineksen ravinteita vapautuu kasveille käyttökelpoiseen muotoon

Julkaisija Helsingin yliopisto  
Ruralia-instituutti  
[www.helsinki.fi/ruralia](http://www.helsinki.fi/ruralia)

Kampusranta 9 C  
60320 SEINÄJOKI

Lönnrotinkatu 7  
50100 MIKKELI

Sarja Raportteja 188

Kannen kuva Tuomas Mattila ja Jaana Huhtala

ISBN 978-951-51-3768-5 (pdf)

ISSN 1796-0630 (pdf)

# ESIPUHE

Maatalouden tärkeimmät resurssit ovat viljelijän osaaminen ja peltomaan kasvukunto. Maan kasvukunto vaikuttaa ratkaisevasti saavutettuihin satotasoihin ja edelleen käytettävien tuotantopanosten hyötysuhteisiin, viljelyn kannattavuuteen ja ympäristövaikutuksiin. Peltomaa on monimutkainen järjestelmä, jonka kokonaisvaltainen hallinta vaatii uudenlaista osaamista sekä uusia työkaluja ja käytäntöjä. Viljelijöitä askarruttaa monen lohkon kohdalla, miksi tällä lohkoilla sato jää huomattavasti pienemmäksi kuin muilla lohkoilla.

Typpilannoitus on merkittävä tuotantopanos, jonka tavoitetaso on vaikea määrittää. Suomessa on aiemmin käytetyt menetelmät typpilannoituksen tarkentamiseen (multavuusluokat, liukoisen typen määritys keväällä) eivät ole yleistyneet tai eivät ole kuvanneet lohkojen eroja typen vapautumisessa. Tässä raportissa esitellään kaksi maailmalla viime aikoina yleistynyttä typen vapautumisen arviointimenetelmää, jotka perustuvat maan mikrobiologisen aktiivisuuden ja orgaanisten typpivarantojen määritykseen. Hiilidioksidipulssiin pohjautuvaa Soil Health Tool menetelmää on käytetty Yhdysvalloissa sekä typpilannoituksen tarkentamiseen että maan kasvukunnon seurantaan. Hapeton muhutus on ollut pidempään käytössä, mutta on yleistynyt vasta viime aikoina, kun sen tuloksia on kyetty ennustamaan lähi-infrapunamenetelmillä.

Tässä raportissa esitellään kummankin menetelmän taustalla oleva tutkimuskirjallisuus. Sen lisäksi raportissa esitetään tuloksia OSMO-hankkeen 24 koelohkolta kolmen vuoden ajalta. Tulosten perusteella annetaan ohjeita typen vapautumisen arviointiin ja menetelmien luotettavaan käyttöön.

*OSMO - Osaamista ja työkaluja resurssitehokkaaseen maan kasvukunnon hoitoon yhteistyöllä*-hanketta toteuttavat Helsingin yliopiston Ruralia-instituutti, ProAgria Etelä-Pohjanmaa ja ProAgria Länsi-Suomi. Hanketta rahoittavat Varsinais-Suomen ELY-keskus Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmasta 2014-2020, Vesiensuojelun ja ravinteiden kierrätyksen erillisrahoituksella, Eurofins Viljavuuspalvelu Oy, Soilfood Oy, Tyynelän Maanparannus Oy, Ecolan Oy, viljelijät sekä Luomusäätiö ja Rikalan Säätiö. Kiitämme rahoittajia tämän työn mahdollistamisesta.

Kiitämme OSMO-tilakokeen viljelijöitä koelohkojen antamisesta tutkimuksen käyttöön ja koelohkojen viljelytöiden suorittamisesta ja tutkimustulosten saamisesta. Kiitokset myös Helsingin yliopistolle erikoistyön käytöstä osana tutkimushanketta sekä Soilfood Oy:lle työajan tarjoamisesta raportin viimeistelyyn. Raportin taitosta ja ulkoasusta kiitämme graafinen suunnittelija Jaana Huhtalaa.

Toivomme *Uusia menetelmiä maaperästä vapautuvan typen määrän arviointiin*-raportin palvelevan suomalaisia viljelijöitä typpilannoituksen tarkentamisessa kasvien tarpeita vastaavaksi.

Mikkelissä marraskuussa 2018

Tekijät



# SISÄLLYS

---

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	7
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>1 JOHDANTO</b> .....	11
<b>2 SUOMESSA NYKYISIN KÄYTÖSSÄ OLEVAT TYPEN VAPAUTUMISEN ARVIINTIMENETELMÄT</b> .....	12
2.1 Liukoinen epäorgaaninen typpi ("typpisalkku") .....	12
2.2 Maaperän multavuus .....	12
2.3 Porraskokeet, ali- ja yllannoitusikkunat .....	13
<b>3 SOIL HEALTH TOOL</b> .....	14
3.1 Potentiaalisesti vapautuvan typen määrän arviointi .....	14
3.2 Menetelmän kuvaus .....	15
3.3 Menetelmän tarkkuus .....	16
3.4 Näytteenottoajankohdan ja näytteen käsittelyn vaikutukset .....	18
3.5 Soveltuvuus Suomen olosuhteisiin .....	18
<b>4 HAPETON MUHITUS</b> .....	20
4.1 Potentiaalisesti vapautuvan typen arviointi .....	20
4.2 Menetelmän kuvaus .....	20
4.3 Menetelmän tarkkuus .....	21
4.4 Soveltuvuus Suomen olosuhteisiin .....	22
4.5 Näytteenottoajankohdan ja näytteen käsittelyn vaikutukset .....	23
<b>5 KOKEMUKSIA MENETELMIEN SOVELTAMISESTA OSMO-HANKKEEN KOELOHKOILLA</b> .....	24
5.1 Aineisto ja menetelmät .....	24
5.2 Vuosien välinen vaihtelu typen vapautumisennusteessa ja maaperän liukoisessa työssä .....	24
5.3 Vastaavuus typen vapautumisennusteen, multavuuden ja liukoisen typen välillä .....	26
5.4 Vastaavuus typen vapautumisennusteen ja kasvuston typpipitoisuuden välillä .....	27
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	28
<b>7 LÄHTEET</b> .....	29





## TIIVISTELMÄ

Merkittävä osa kasvin käyttämästä typestä on peräisin maaperän eloperäisestä aineesta ja kasvin-tähteistä. Näiden vaikutus on arvioitu Suomessa aiemmin multavuusluokkien avulla, joiden perusteella on tarkennettu typpilannoitusta. Maaperästä vapautuvan typen määrä riippuu kuitenkin suuresti maan kasvukunnosta ja mikrobiaktiivisuudesta. Mikäli tämä saataisiin määritettyä tarkemmin, lannoitusta voitaisiin räätälöidä paremmin lohkotasolle.

Tässä raportissa kuvataan uusia menetelmiä maaperästä vapautuvan typen määrän arviointiin sekä esitetään mittaustuloksia kolmen vuoden ajalta OSMO hankkeen 24 koelohkolta. Työ on jaettu kahteen osioon, ensimmäisessä osiossa aihetta käsitellään kirjallisuuden avulla ja toisessa osiossa arvioidaan menetelmien käyttökelpoisuutta kokeellisen aineiston avulla. Lopuksi annetaan suosituksia menetelmien käytöstä lannoitussuunnittelun osana.



# ABSTRACT

## NEW METHODS FOR ESTIMATING NITROGEN MINERALIZATION FROM SOIL

A considerable share of plant nitrogen uptake originates from the decomposition of soil organic matter and plant residues. Traditionally these have been taken into account in fertilizer planning by having recommended nitrogen levels for various classes of soil organic matter. However the amount of nitrogen mineralization depends also on overall soil health and microbial activity. If these could be measured more accurately, fertilizer recommendations could be tailored at field level.

The report describes new methods for estimating nitrogen mineralization from soil and presents measurement results from 24 test fields for a three year period. The report has two sections, the first one is a literature survey on the estimation methods and the second is an evaluation of the usefulness of the methods. Finally recommendations on the use of the methods for fertilizer planning are presented.



# 1 JOHDANTO

Typen mineralisoituminen eli vapautuminen maaperässä muuttaa orgaanisessa muodossa olevia typiyhdisteitä liukoiseen ja epäorgaaniseen muotoon. Jos typen vapautumista peltomaassa pystytään arvioimaan tarkasti, voidaan tietoa hyödyntää lannoitus suunnittelussa, maataloustuotannon kestävyden kehityksessä ja typen huuhtoutumisriskin pienentämisessä (Schomberg ym. 2009, Soon ym. 2007, Wivstad ym. 2005).

Perinteisesti maaperästä *potentiaalisesti mineralisoituvaa typpeä* (PMN) on arvioitu pitkäkestoisilla hapellisilla muhityskokeilla (aerobinen inkubaatio) (Stanford ja Smith 1972) ja kasvuston typenottoa mittaamalla (Keeney ja Bremner 1966, Fox ja Piekielek 1984). Näillä menetelmillä saadaan tarkkoja arvioita vapautuvan typen määrästä, mutta ne ovat liian pitkäkestoisia ja työläitä yleisesti käytössä oleviksi testimenetelmiksi (Keeney 1982, Curtin ja Campbell 2008), minkä takia niitä käytetään lähinnä vertailukohtina tutkittaessa lyhyemmässä ajassa toteutettavia arviointimenetelmiä.

Suomessa potentiaalisesti vapautuvaa typpeä (PMN) on arvioitu mittaamalla keväällä maaperässä ruokamultakerroksessa olevan liukoisen kivennäistypen määrää. EU:n ympäristökorvauksen ehdoissa sallitti kasvilajikohtainen typpilannoitus-

määrä puolestaan on sidottu peltolohkon multaavuuteen. Nämä menetelmät ovat verrattain nopeita ja helppoja toteuttaa, mutta niiden suhde typen vapautumiseen on todettu tutkimuksissa epäselväksi tai ne eivät ole olleet riittävän herkkiä havaitsemaan muutoksia maaperän kunnossa (Morrow ym. 2016).

Tässä kirjallisuuskatsauksessa esitellään kaksi lupaavalta vaikuttavaa typen vapautumisen arviointimenetelmää. *Soil Health Tool* on Yhdysvalloissa viime vuosien aikana kehitetty laboratorioanalyysi, joka arvioi typen vapautumista mittaamalla hiilidioksidintuotantoa kuivatusta ja uudelleen kastelusta maanäytteestä (ns. CO<sub>2</sub>-burst testi) (Haney ym. 2012). Hiilidioksidin tuotanto 24 tunnin aikana korreloi maaperän mikrobibiomassan, helposti hajovien hiilyhdisteiden ja typen vapautumisen kanssa (Haney ym. 2012). *Anaerobinen inkubaatio* on alun perin Keeneyn ja Bremnerin (1964) esittelemä lyhytkestoinen muhitysmenetelmä, jossa mitataan maanäytteen kivennäistypen tuotantoa happeottomissa olosuhteissa. Menetelmässä hapellisia oloja vaativat mikrobit tuhoutuvat ja hapeottomissa oloissa selviävät mikrobit hajottavat ne. Vapautuva typpimäärä vastaa maaperän mikrobimassaa.

## 2 SUOMESSA NYKYISIN KÄYTÖSSÄ OLEVAT TYPEN VAPAUTUMISEN ARVIOINTIMENETELMÄT

### 2.1 LIUKOINEN EPÄORGAANINEN TYPPI ("TYPPISSALKKU")

Liukoisella epäorgaanisella typellä tarkoitetaan maaperässä olevaa ammonium-, nitriitti- ja nitraattityppeä ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Maaperässä on kuitenkin vain harvoin merkittäviä määriä nitriittityppeä, minkä vuoksi usein mitataan vain ammonium- ja nitraattityppeä (Leppänen ja Esala 1995). Maaperässä oleva liukoinen epäorgaaninen typpi on lannoitusarvoltaan lannoitetypen veroista (Keeney 1982). Suomessa typpilannoituksen määrää on tarkennettu mittaamalla keväisin maaperässä olevaa epäorgaanista typpeä ja vähentämällä sen määrä tuotantokasvin typpilannoitustarpeesta. Typpilannoituksen tarkennus oli korvattava ympäristötuen lisätoimenpide vuosina 2007-2013, mikä johdosta se oli yleisessä käytössä.

Liukoinen epäorgaaninen typpi on hyvin altista huuhtoutumiselle, mistä johtuen sen määrä maassa vaihtelee huomattavasti, erityisesti kosteissa ilmastoissa (Keeney 1982). Suomessa huuhtoutumisalttius korostuu keväisin lumipeitteen sulaessa. Keväällä mitattavan liukoisen typen vähäinen määrä voi näin ollen johtaa kasveille käyttökelpoisen typen määrän aliarvioimiseen. Leppänen ja Esalan (1995) tutkimuksessa keväällä ennen kylvöä kerättyjen maanäytteiden typpimäärä 0-60 cm syvyydellä maanpinnasta vaihteli välillä 7-276 kg/ha. Tutkituista alueista 60 %:lla epäorgaanisen typen määrä oli alle 30 kg/ha. Ympäristötuen lisätoimenpiteenä tehty typpilannoituksen tarkennus perustui ruokamultakerroksen typpipitoisuuteen keväällä ja tulokset olivat usein alle 10 kg/ha. Pitoisuudet nousivat vasta kesällä maan lämmettyä. (Kaasinen ym. 2010).

Korrelaatio liukoisen epäorgaanisen typen ja vapautuvan typen määrän (PMN) välillä on todettu useissa tutkimuksissa heikoksi (Haney ym. 2001, Schomberg ym. 2009, Bustamante ja Hartz 2015). Haney ym. (2001) tutkimuksessa karjanlannalla lannoitetulla maaperällä ei havaittu merkittäviä korrelaatiota epäorgaanisen typen määrän ja 24

vuorokauden muhituksen aikana vapautuvan typen välillä (p-arvot peräkkäisinä vuosina 0,562 ja 0,173). Tutkimuksessa epäorgaanisen typen ja kasvuston typenoton suhteet eivät niin ikään olleet merkittäviä (p-arvot 0,233 ja 0,055 peräkkäisinä vuosina). Schombergin ym. (2009) tutkimuksessa korrelaatio epäorgaanisen typen ja vapautuvan typen välillä oli merkittävä, muttei vahva ( $r=0,62$ ,  $p<0,001$ ). Bustamante ja Hartz (2015) saivat tutkimuksessaan samansuuntaisen tuloksen ( $r=0,54$ ,  $p<0,014$ ). Suomalaisissa oloissa maan epäorgaanisen typen määrittäminen on epäluotettava tapa arvioida typen vapautumista. Typen vapautumista tapahtuu enemmän vasta kesällä, jolloin tuloksiin vaikuttaa maaperästä vapautuvan typen lisäksi myös kasvin typenotto ja lannoitus.

### 2.2 MAAPERÄN MULTAVUUS

Ympäristökorvauksen sallimat enimmäistyppilannoitusmäärät vaihtelevat kasvilajikohtaisesti ja viljelysmaan multavuuden mukaan (Valtioneuvosto 2015). Taustalla on oletus, että korkea maaperän eloperäisen aineen määrä ennustaa myös suurempaa typen vapautumista. Esimerkiksi ohralla ympäristökorvauksen sallimat typpilannoituksen enimmäismäärät vaihtelevat 60 kg/ha:sta (eloperäiset maat) 100 kg/ha:aan (vähämultaiset ja multavat maat), joten eloperäisistä maista oletetaan vapautuvan 40 kiloa enemmän typpeä hehtaarilta kuin vähämultaisista maista.

Korrelaatio maan multavuuden ja typen vapautumisen (PMN) välillä on havaittu useissa tutkimuksissa vahvaksi (Nyiraneza ym. 2009, Schomberg ym. 2009, McDonald ym. 2014). Nyirazeran ym. (2009) tutkimuksessa maaperän orgaanisen hiilen määrä korreloi maissikasvuston typenoton (selitysaste  $r^2=0,74$ , todennäköisyys sattumanvaraisuudelle  $p<0,001$ ) ja sadon ( $r^2=0,80$ ,  $p<0,001$ ) kanssa. Schomberg ym. (2009) havaitsivat voimakkaan korrelaation maaperän kokonaishiilen ja PMN:n välillä ( $r^2=0,89$ ,  $p<0,001$ ). McDonaldin ym.

(2014) aineistolla maaperän orgaaninen aines korreloi 7 vuorokauden hapettoman muhituksen aikana vapautuvan typen kanssa ( $r^2=0,781$ ,  $p<0,001$ ).

Näin ollen tutkimuskirjallisuuden perusteella orgaanisen aineen määrä ennustaa typen vapautumista melko hyvin. Menetelmänä se ei kuitenkaan ole herkkä viljelykäytäntöjen vaikutukselle tai nopeille muutoksille typen vapautumisessa, mikä vähentää sen käyttökelpoisuutta (McDonald ym. 2014).

Suomessa maan multavuuden arviointi on pitkään perustunut aistinvaraiseen arviointiin ja multavuusluokkiin. Menetelmän erottelukyky on heikko, sillä esimerkiksi runsasmultaiseen luokkaan kuuluvat kaikki pellot, joissa on eloperäistä ainetta 6-12 %. Mikäli typen vapautuminen on sidoksissa multavuuteen, yhden luokan sisällä voi olla kaksinkertainen ero typen vapautumisennusteessa. Lisäk-

si maaperän C:N -suhde vaihtelee lohkoittain, millä on vaikutusta myös typen vapautumiseen (Mattila ja Rajala, 2017).

## 2.3 PORRASKOKEET, ALI- JA YLILANNOITUSIKKUNAT

---

Eräs menetelmä typpilannoituksen tarkentamiseen on porraskoe. Yksinkertaisimmillaan pellolle tehdään nykykäytäntöön verrattuna yli- ja alilannoitusruudut. Mikäli koeruudussa väri poikkeaa selvästi muusta kasvustosta, lannoituksella voidaan päätellä olevan vaikutusta satotasoon. Yleensä ruutumenetelmässä hyödynnetään lehtivihreämittareita tai NDVI antureita, joita on käsitelty laajemmin eri raportissa (Mattila ym. 2018).

## 3 SOIL HEALTH TOOL

*Soil Health Tool* on maaperän kunnan arvioimiseen tarkoitettu laboratorioanalyysi, jonka ovat yhteistyössä kehittäneet Yhdysvaltojen maatalouden tutkimuslaitos ARS ja yksityinen viljavuustutkimuslaitos Woods End Laboratories. *Soil Health Tool* tarjoaa viljelijälle maaperänäytteen pohjalta kokonaisvaltaisen analyysin maaperän yleiskunnosta, sen sisältämistä helppokäyttöisistä ravinteista sekä biologisesta aktiivisuudesta. Menetelmä painottaa erityisesti maaperän mikrobitoiminnan merkitystä maan kunnolle ja prosesseille.

### 3.1 POTENTIAALISESTI VAPAUTUVAN TYPEN MÄÄRÄN ARVIOINTI

*Soil Health Tool* käyttää typen vapautumisen arvioimiseen Haneyn ym. (2008) esittelemää menetelmää, joka pohjaa oletukseen maaperän mikrobitiivisuuden ja typen vapautumisen korrelaatiosta. Maaperän mikrobiston ja typen vapautumisen suhde on todettu useissa tutkimuksissa (Carter ja Rennie 1982, Doran 1987, Franzluebbers ym. 1994). Haneyn ym. (2008) menetelmässä kuivatusta ja uudelleen kostutetusta maaperänäytteestä mitataan 24 tunnin muhituksen aikana vapautuva hiilidioksidi, jonka perusteella vapautuvan typen määrä arvioidaan. Hiilen vapautumisen lisäksi menetelmä käyttää toisena mittarina maaperän vesiliukaisen orgaanisen hiilen ja typen suhdetta (Haney ym. 2012). Hiili:typpisuhteen avulla arvioidaan, kuinka paljon tyyppiä vapautuu, kun tietty määrä hiilyhdisteitä hajotetaan.

Kuten muillakin eliöillä, maaperän mikrobin hengityksessä syntyy hiilidioksidia hapellisissa oloissa. Maanäytteestä vapautuvaa hiilidioksidia on jo pitkään käytetty kuvaamaan maan viljavuutta ja mikrobitiivisuutta (Gainey 1919, Lebedjantzev 1924, Birch 1960). Tyypillisesti hiilidioksidin määrä on mitattu pitkän, 14–210 vuorokauden muhituksen ajalta (Keeney 1982). Menetelmän ajallisen keston lyhentämiseksi on kuitenkin mahdollista hyödyntää maan kuivaamisen ja uudelleen kostuttamisen aikaansaamia muutoksia hiilen vapautumisessa.

Maanäytteen kuivaaminen ja uudelleenkastelu tuottaa 2–6 päivää kestävästä hiilidioksidipulssin, jonka aikana hiilidioksidia saattaa vapautua jopa

500 % enemmän kuin koko ajan kosteana pidetystä näytteestä (Fierer ja Schimer 2003). Ilmiö on tunnettu jo pitkään (Birch 1958), mutta sen tarkkaa mekanismia ei tunneta (Fierer ja Schimer 2003). Hiilidioksidipulssin synnyn aiheuttajiksi on epäilty ainakin elottoman orgaanisen aineen muuttumista alttiimmaksi mikrobitoiminnalle kuivumisen ja uudelleenkostumisen seurauksena (Adu ja Oades 1978) ja osmoottisesta paineesta hajoavien mikrobisolujen sisältämien hiilyhdisteiden nopeaa hajottamista jäljellejäävien mikrobien toimesta (Halverson ym. 2000). Fiererin ja Schimerin (2003) mukaan uudelleen kostutetun maan hiilidioksidipulssi on lähes kokonaan peräisin mikrobibiomassan sisältämän hiilen vapautumisesta, eikä esimerkiksi maan liukaisen orgaanisen hiilen varannoista. Heidän hypoteesinsa on, että vapautuva hiilidioksidi syntyy pääosin solunsisäisten yhdisteiden nopeasta hajoamisesta mikrobien reagoidessa maan kostumiseen.

Franzluebbers (1999) havaitsi, että kun maanäyte kuivataan ja kastellaan uudelleen, ensimmäisten kolmen vuorokauden aikana vapautuva hiilidioksidi korreloi hyvin ( $r^2=0.96$ ) koko 24 vuorokauden muhituksen aikana vapautuvan hiilidioksidimäärän kanssa. Myöhemmän tutkimuksen perusteella kuivatusta ja uudelleen kostutetuista maanäytteistä ensimmäisten 1–3 vuorokauden aikana vapautuva hiili korreloi voimakkaasti myös sadan vuorokauden hiilidioksidintuoton ja maaperän mikrobibiomassan sisältämän hiilen kanssa (Haney ym. 1999, Franzluebbers ym. 2000). Kuivaamisen ja uudelleen kostuttamisen seurauksena ensimmäisen vuorokauden aikana vapautuva hiilidioksidi korreloi merkittävästi myös 21 vuorokauden hapellisen muhituksen vapautuvan typen kanssa (Franzluebbers ym. 1996). Suhde hiilidioksidipulssin ja vapautuvan typen välillä on havaittu merkittäväksi myös myöhemmässä tutkimuksessa (Franzluebbers ym. 2000, Haney ym. 2001, Haney ym. 2008, Haney ym. 2015, Franzluebbers 2016).

Maaperän korkea mikrobitiivisyys ei yksinään riitä vapautuvan typen määrän arvioimiseen tarkasti (Haney ym. 2012). Jos maaperässä on paljon hiiltä suhteessa tyypeen (korkea C:N suhde), aktiivinen mikrobisto voi sitoa tyyppiä kasveille käyttökeltottomaan muotoon (immobilisaatio) (Tate 1995). Taten mukaan maaperän orgaanisen hiilen ja typen suhdetta 20:1 on perinteisesti pidetty



rajana, jota korkeammalla suhteella typpeä pidätty enemmän kuin vapautuu. Tämä luku on johdettu mikrobibiomassan hiili-typpi-suhteesta 10:1 sekä mikrobiston oletetusta 50 prosentin energiankäytön tehokkuudesta (Sylvia ym. 2005). Oletus on yleinen keskiarvo ja eri peltolohkoilla on vaihtelua sekä mikrobistossa että niiden hyötysuhteessa. Yleisesti ottaen sienten aineenvaihdunta on tehokkaampaa kuin bakteerien.

Haney ym. (2012) pitävät maan vesiliukoisien orgaanisen hiilen (WEOC, water extractable organic carbon) suhdetta vesiliukoiseen orgaaniseen tyypeen (WEON) orgaanisen hiilen (OC) ja typen (ON) suhdetta parempana mittarina typen pidättymiselle ja vapautumiselle, sillä se kirjoittajien mukaan on herkempi mikrobiaktiivisuuden vaihtelulle sekä kuvaa paremmin orgaanisen hiilen ja typen laatua ja käyttökelpoisuutta mikrobeille. WEOC ja WEON korreloivat voimakkaasti maaperän mikrobiaktiivisuuden kanssa (Woodmansee ja Duncan 1980), ja ne ovat keskeisessä roolissa mikrobiston ylläpitämässä ravinnekierrossa (Burford ja Bremner 1975). Haney ym. (2012) tutkimuksessa havaittiin selviä eroja kahden mittarin antamissa tuloksissa: 50 maanäytteestä neljän näytteen OC:ON oli yli 20, mutta samoista näytteistä kuudentoista WEOC:WEON ylitti saman arvon. Vesiliukoinen hiili:typpi suhde on siis herkempi tunnistamaan lohkojen välisiä eroja mikrobeille käyttökelpoisen orgaanisen aineen laadussa.

### 3.2 MENETELMÄN KUVAUS

Haney ja Haney (2010) suosittelevat, että vapautuvan typen arvioinnissa käytettävät maanäytteet

kuivataan 50 °C yön yli ja jauhetaan niin että ne läpäisevät 2 mm silmäkoon seulan.

Mikrobiaktiivisuus arvioidaan hiilidioksidintuoton perusteella. Maanäytteet kastellaan kapillaarisesti. 40 grammaa kuivaa maata punnitaan 50 ml vetoiseen muoviseen koelasiin, jonka pohjassa on 4-5 kpl 6,35 mm reikiä, ja jonka pohjalle on asetettu mikrokuitufiltteri estämään näytteen valuminen rei'istä. Koelasi asetetaan 240 ml kannelliseen lasiasiaan, jonka pohjalla on 25 ml vettä. Kapillaarinen vedennousu kastelee maanäytteen vakiokosteuteen (kenttäkapasiteetti), jossa maa on täysin kostunut, mutta hapellinen. Tämän jälkeen maanäytteeseen asetetaan Solvitan hiilidioksidi-indikaattoriuliuska, lasiastian kansi suljetaan ja näytettä muhitetaan 25 °C lämpötilassa 24 tunnin ajan (Haney ja Haney 2010). Muhituksen jälkeen Solvitan hiilidioksidi-indikaattori poistetaan näytteestä ja indikaattorissa tapahtuneet värimuutokset mitataan spektrometrillä. Värimuutokset vastaavat hyvin korkeinta hiilidioksidipitoisuutta, joka oli näyteastiassa kokeen aikana.

Vesiliukoinen orgaaninen hiili ja typpi määritetään neljästä grammasta kuivaa maata joka sekoitetaan 40 ml:ään deionisoitua vettä (Haney 2012). Näytettä sentrifugoidaan 5 minuuttia 3500 rpm kierrosluvulla, jonka jälkeen vesi suodatetaan suodatinpaperin läpi ja analysoidaan hiilen ja typen kokonaispitoisuuksien osalta standardimenetelmillä. Vesiliukoisien orgaanisen typen pitoisuus saadaan vähentämällä vesiliukoisesta kokonaistypestä epäorgaanisen typen (NH<sub>4</sub>-N ja NO<sub>3</sub>-N) määrä (Haney 2012).

Soil Health Tool analyysipaketissa mittaustulokset muunnetaan ennusteeksi kasveille vapautuvan käyttökelpoisen typen- ja fosforin määristä seuraavilla kaavoilla (Haney et al. 2018):

$$\text{Typen vapautuminen } N_{\min} = (\text{CO}_2\text{-burst-C} : \text{WEOC}) \times \text{WEON} \times 2,24 \times n, \quad (1)$$

missä  $N_{\min}$  = typen vapautumisennuste (kg/ha)  
 CO<sub>2</sub>-burst = 24 tunnin aikana vapautunut hiilidioksidi hiilenä (mg/kg)  
 WEOC = maanäytteen vesiliukoinen orgaaninen hiili (mg/kg)  
 WEON = maanäytteen vesiliukoinen orgaaninen typpi (mg/kg)  
 2,24 = muuntokerroin mg/kg yksiköstä kg/ha yksikköön  
 n = kasvukauden aikaisten runsaitten (>25 mm) sateitten lukumäärä (oletus n=4)

$$\text{Fosforin vapautuminen } P_{\min} = (\text{CO}_2\text{-burst-C} : \text{WEOC}) \times \text{H3A-P} \times 2,24 \times n \quad (2)$$

missä  $P_{\min}$  = fosforin vapautumisennuste (kg/ha)  
 H3A-P = kasveille käyttökelpoisen fosforin pitoisuus maassa (mg/kg)

Kasveille käyttökelpoisen typen ja fosforin arvioinnissa vapautumisenmusteisiin lisätään maassa mitatut liukoisen epäorgaanisen typen ja kasveille käyttökelpoisen fosforin määrät. Mikäli maaperän WEOC:WEON on yli 20:1, oletetaan että mikrobiaktiivisuus ei vapauta typpeä kasvien käyttöön. Esi-merkkejä kaavojen sovelluksista on osiossa 5.2.

Suomen olosuhteissa maan kuivumista ja äkillistä kastumista tapahtuu harvemmin kuin Teksasin olosuhteissa. Tämän johdosta oletus neljästä kuivumis-kastumiskierroksesta voi olla liioiteltu ja etenkin kevätilviljoilla yksi kierros ( $n=1$ ) voisi vastata paremmin käytäntöä, sillä jopa tällä oletetun typen vapautumismäärät ovat huomattavan korkeita (osio 5).

Haney'n menetelmän lisäksi eri kaupalliset laboratoriot ovat kehittäneet omia typen vapautumisenmestemenetelmiään. Esimerkiksi Woods End Laboratories käyttää omaa menetelmäänsä, jossa yhdistetään 24 tunnin hiilidioksidintuotto, maan liukoisten tyyppiyhdisteiden määrä ja alueellinen ilmasto (suullinen tiedonanto, William Brinton, 20.10.2018).

### 3.3 MENETELMÄN TARKKUUS

Franzluebbers ym. (1996) tutkivat kuivumisen ja uudelleenkastelun jälkeen ensimmäisen vuorokauden aikana vapautuvan hiilen suhdetta typen vapautumiseen ja maaperän mikrobibiomassaan. Tutkimuksessa käytetyt näytteet otettiin kahdeksasta teksasilaisesta maatalousmaasta, jotka erosivat toisistaan muun muassa rakenteen, hiukkaskoon, orgaanisen aineen määrän ja viljelykäytäntöjen suhteen. Näytteiden hiilidioksidintuotantoa verrattiin 21 vuorokauden hapellisen muhituksen aikana vapautuvan typen määrään. Hiilen vapautuminen selitti suuren osan vapautuneen typen määrän vaihtelusta ( $r^2=0,85$ ), mutta näytteiden välillä oli merkittäviä eroja. Franzluebbers ym. (1996) muodostivat tulostensa perusteella funktion ( $NMIN_{0-21d} = -4 + 0,89(CMIN_{0-1d})$ ), jolla he ennustivat typen vapautumista käyttäen aineistona aikaisemmin julkaistua tutkimusta. Kuivumisen ja uudelleenkastelun jälkeen ensimmäisen vuorokauden aikana vapautuva hiili ennusti typen nettomineralisaatiota  $\pm 8$  mg N/kg maata keskijajonnalla (8 mg N/kg maata vastaa noin 16 kg N/ha).

Franzluebbers ym. (2000) tutkivat edelleen kuivumisen ja uudelleenkastelun aikaansaaman hiilidioksidipulssin, mikrobibiomassan ja typen vapautumisen suhdetta neljältä eri ilmastolliselta alueelta – Alberta ja Brittiläinen Kolumbia: kylmä-kuiva, Maine: kylmä-kosteaa, Teksas: kuuma-kuiva, Geor-

gia: kuuma-kosteaa – olevilla maanäytteillä. Kolmen vuorokauden aikana vapautunut hiili korreloi koko aineistolla ( $r^2=0,67$ ,  $n=327$ ) 24 vuorokauden muhituksen aikana vapautuvan typen kanssa, mutta suhde ei ollut kuitenkaan yhtä vahva kuin  $CMIN_{0-3d}$  ja muiden aktiivisten orgaanisten fraktioiden välillä. Koko aineistoa käytettäessä  $CMIN_{0-3d}$  ja  $NMIN_{0-24d}$  välillä ei ollut myöskään suoraa lineaarista yhteyttä, minkä kirjoittajat arvelivat johtuvan siitä, että voimakas mikrobiaktiivisuus saattoi myös poistaa typpeä kasvien käytöstä. Eri ilmastollisten alueiden sisällä näytteiden korrelaatiot  $CMIN_{0-3d}$  ja  $NMIN_{0-24d}$  välillä eivät olleet kovin vahvoja ( $r^2\approx 0,5$ ) Mainien osavaltiota lukuun ottamatta. Myös  $CMIN_{0-3d}$  ja  $NMIN_{0-24d}$  suhteen fraktioiden kulmakertoimet erosivat toisistaan eri alueilla: Mainen ja Teksasin maanäytteiden kulmakertoimet olivat merkittävästi suuremmat kuin Albertan ja Brittiläisen Kolumbian sekä Georgian. Ennustettaessa koko aineiston perusteella lasketulla suhteella  $NMIN_{0-24d}$  hiilen vapautumisen ennustetut arvot olivat  $\pm 25$  % todellisista  $NMIN_{0-24d}$  arvoista 45 % tapauksista, ja  $\pm 50$  % todellisista arvoista 77 % tapauksista. Hajonta oli tässä koesarjassa huomattavan suurta.

Haney ym. (2001) tutkivat kuivatun ja uudelleen kastellun maanäytteen ensimmäisen vuorokauden hiilidioksidintuoton suhdetta pitkän muhituksen aikana maanäytteessä vapautuvaan tyypeen sekä kasvuston typenottoon pelto-olosuhteissa. Maanäytteet ja analysoitava kasvusto kerättiin pitkäaikaisesti karjanlannalla lannoitetulta tutkimuspelloilta. Hiilidioksidintuotanto selitti suuren osan typen vapautumisen vaihtelusta 24 vuorokauden muhituksen aikana sekä tutkimuksen ensimmäisenä ( $r^2=0,78$ ,  $P=0,004$ ) että toisena vuotena ( $r^2=0,93$ ,  $P<0,001$ ). Tutkimuksessa tutkittiin myös ensimmäisen vuorokauden hiilidioksidintuoton suhdetta kasvuston typenottoon: tämän vaihtelusta hiilidioksidintuotanto selitti vielä suuremman osan ( $r^2=0,93$ ,  $p<0,001$  ja  $r^2=0,91$ ,  $p<0,001$ ).  $CMIN_{0-1d}$  myös selitti kasvuston typenoton vaihtelusta hieman suuremman osan kuin 24 vuorokauden hapellisen muhituksen aikana vapautuva tyyppi. Kulmakertoimet  $CMIN_{0-1d}$  ja kasvuston typenoton suhdetta kuvaavassa funktiossa olivat molempina tutkimusvuosina hyvin samansuuret (7,11 vuonna 1995 ja 7,13 vuonna 1996).

Haney ym. (2008) selvittivät, vaikuttaako hiilidioksidin mittaustapa tuloksiin. He vertailivat kemiallista titrausta ja Solvita-mittausta hiilidioksidipulssin määrittämisessä sekä tutkivat kuivumisen ja uudelleen kastelun synnyttämän hiilidioksidipulssin suhdetta hiilen, typen ja fosforin vapautumiseen karjanlantakompostilla lannoitetussa maassa. Solvita tulokset vastasivat hyvin perinteistä titraus-

menetelmää ( $r^2=0,84$ ). Lisäksi hiilidioksidipulssi vastasi hyvin  $CMIN_{7-28d}$  eli pulssin jälkeistä perushengitystasoa ( $r^2=0,84$ (titraatio) ja  $0,80$ (Solvita)). Tämän perusteella kirjoittajat arvioivat Solvitamenetelmän kuvaavan luotettavasti hiilidioksidin tuottoa. Hiilidioksidimäärä korreloi merkittävästi muhituksen aikana vapautuvan typen  $NMIN_{0-28d}$ :n kanssa. Molemmilla menetelmillä mitattujen hiilidioksidipulssien ja maanäytteisiin lisätyn lantakompostin määrällä oli merkittävä lineaarinen yhteys, minkä perusteella kirjoittajat päättelivät kuivaamisen ja uudelleen kostuttamisen synnyttämän hiilidioksidipulssin kykenevän ilmentämään muutoksia maaperässä ja viljelytoimenpiteissä.

Haney ym. (2015) tutkivat kuivatuista ja uudelleen kostutetuista maanäytteistä ensimmäisen vuorokauden aikana vapautuvan hiilidioksidin ja 7 vuorokauden hapettoman muhituksen (anaerobisen inkubaation, ks. luku 4) aikana vapautuvan typen suhdetta. Tutkimuksessa käytettiin satunnaisesti valittuja maanäytteitä ( $n=257$ ) Englannista sekä eri puolilta Yhdysvaltoja. Maanäytteiden orgaanisen aineen pitoisuudet vaihtelivat  $0,8-7,5$  % välillä. Solvita-testillä mitattu hiilidioksidintuotanto (mg C/kg maata) selitti suuren osuuden ( $r^2=0,82$ ) hapettoman muhituksen aikana vapautuneen typen määrän vaihtelusta. Kirjoittajat ehdottavat tulosten pohjalta typen vapautumisen ennustamiseen kaavaa  $PMN$  (mg N/kg maata) =  $1,23 \times$  Solvita-testin tulos -  $9,7$ . Kirjoittajat kuitenkin totesivat, että sellaisenaan Solvita-testillä ei pystytä havaitsemaan mahdollista typen pidättymistä maaperässä.

Schomberg ym. (2009) vertailivat erilaisia vapautuvan typen (PMN) arviointimenetelmiä keskenään ja tutkivat saataisiinko eri menetelmien tuottamaa tietoa yhdistelemällä tarkempia arvioita PMN:lle. Kuivaamisen ja uudelleenkastelun aikaansaamaa hiilidioksidipulssia mitattiin kolmen vuorokauden ajan Franzluebbersin ym. (2000) esittelemällä menetelmällä.  $CMIN_{1-3d}$  korreloi 41 viikon hapellisen muhituksen aikana vapautuneen typen kanssa  $r$ -arvolla  $0,81$  ( $p < 0,001$ ), mikä edusti tutkimuksen sisältämistä menetelmistä keskitasoa. Yksittäisistä menetelmistä parhaiten  $NMIN_{2-41wk}$ :ta ennustivat 7 vuorokauden hapettoman muhituksen ja 24 vuorokauden hapellisen muhituksen aikana vapautuva tyyppi. Tutkimuksessa paras ennustettavuus  $NMIN_{2-41wk}$ :lle löydettiin yhdistämällä arviointimenetelmistä maaperän kokonaistyyppi (arvioitu polttomenetelmällä) ja  $CMIN_{0-3d}$  ( $r^2=0,86$ ). Kirjoittajat ehdottivat näiden yhdistelmää verrattain nopeaksi ja tarkaksi laboratoriomenetelmäksi vapautuvan typen määrän arvioimiseksi.

McDonald ym. (2014) tutkivat joukkoa kemiallisia ja biologisia vapautuvan typen määrän ar-

viointimenetelmiä verraten niillä saatavia tuloksia 7 vuorokauden hapettoman muhituksen aikana vapautuvaan tyypeen. Tutkimuksessa käytetyt maanäytteet ( $n=35$ ) kerättiin pysyviltä laitumilta Irlannista. Kuivumisen ja uudelleenkastelun synnyttämä hiilidioksidipulssi mitattiin yhden vuorokauden ajalta Haneyn (2008) esittelemän menetelmän mukaan.  $CMIN_{0-1d}$  korreloi vapautuvan typen määrän kanssa  $r$ -arvolla  $0,69$ , ja selitti  $47$  % vapautuvan typen vaihtelusta, kun taas esimerkiksi kokonaishiili, kokonaistyyppi ja orgaanisen aineen määrä selittivät  $61-67$  % vaihtelusta. Kirjoittajien mukaan kokonaishiili, -typpi tai orgaanisen aineen määrä eivät kuitenkaan ole tarpeeksi herkkiä mittareita havaitsemaan lyhyen aikavälin muutoksia typen vapautumisessa. Parhaiten tutkimuksessa vapautuvan typen määrän vaihtelua selitti Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT), jossa yhdistetään mittaukset maaperän aminosokeritypeistä ja alueelliset lannoituskokeet.

Bustamante ja Hartz (2015) tutkivat typen saatavuuden ennustettavuutta alkutuotantokaudesta luonnonmukaisessa tomaatinviljelyssä. Tutkimuksessa selvitettiin myös Soil Health Toolin tarkkuutta typen vapautumisen arvioinnissa käyttäen vertailumenetelmänä 28 vuorokauden hapekasta muhitusta. Hiilidioksidintuotanto mitattiin yhden vuorokauden ajalta käyttäen Haneyn ym. (2008) esittelemää menetelmää ja WEOC/WEON-suhde Haneyn (2012) käyttämällä menetelmällä. 37 tutkimuksessa mukana olleesta testipellosta 20 otettiin näytteet typen vapautumisen määrittämistä varten.  $CMIN_{0-1d}$ :n ja  $NMIN_{0-28d}$ :n välinen korrelaatio todettiin tutkimuksessa heikoksi ( $r=0,44$ ,  $p=0,051$ ). WEOC ( $r=0,63$ ,  $p=0,03$ ) ja WEON ( $r=0,61$ ,  $p=0,04$ ) puolestaan korreloivat vahvemmin  $NMIN_{0-28d}$ :n kanssa. WEOC/WEON-suhde ei korreloinut typen vapautumisen kanssa merkittävästi ( $r=-0,15$ ,  $p=0,526$ ).

Moore ym. (2016) tutkivat lannan lisäämisen vaikutusta peltomaan eloperäisen aineksen pitoisuuteen, liukoisiin suoloihin ja kasville käyttökelpoiseen tyypeen ja arvioivat erinäisten arviointityökalujen käyttökelpoisuutta typen vapautumisen ennustamisessa idaholaisella maaperällä. Vertailumenetelmänä käytettiin sadan vuorokauden hapekasta muhitusta. Tutkittavat maanäytteet kerättiin vuosina 2013, 2014 ja 2015 tutkimuskentiltä, joita oltiin lannoitettu erilaisilla lantamäärillä. Myös lannoittamattomalta kontrollipelloilta ja väkilannoitetulta pelloilta otetut näytteet sisällytettiin aineistoon. Soil Health Toolilla saadut tulokset selittivät hapellisella muhituksella saatujen tulosten vaihtelua ( $r^2=0,58$ ), mutta testillä arvioitu vapautuvan typen määrä oli 20-kertaisesti pienempi kuin ha-

pekkaalla muhituksella arvioitu typen vapautumisen. Hapekkaalla muhituksella arvioitu typen vapautuminen vaihteli tutkimuksessa välillä 50-330 kg N/ha kun taas Soil Health Toolilla saadut typen vapautumisen arviot jäivät kaikista näytteistä pienemmiksi kuin 20 kg N/ha. Ilmeisesti raaka lanta vaatii aikaa hajotakseen ja lyhytaikainen hiilidioksidipurske ei kuvaa kasvukauden aikana kiihtyvää hajotustoimintaa.

### 3.4 NÄYTTEENOTTOAJANKOHDAN JA NÄYTTEEN KÄSITTELYN VAIKUTUKSET

Haney ym. (2001) tutkimuksessa texasilaisilla maaperillä maaliskuu osoittautui parhaaksi näytteenottoajankohdaksi Soil Health Toolille. Maaliskuussa kerättyjen näytteiden hiilidioksidintuotanto korreloi voimakkaimmin vapautuvan typen kanssa, ja sen katsottiin olevan myös paras ajankohta näytteenotolle lannoitus suunnittelun kannalta (Haney ym. 2001).

Suomessa typen vapautuminen kiihtyy keväällä vasta maan lämpenemisen myötä, sillä kemialliset ja mikrobiologiset reaktiot ovat hitaita alhaisessa lämpötilassa (Leppänen ja Esala 1995). Suomessa typen vapautuminen on suurempaa keväisin kuin syksyisin (Palojärvi ym. 2002), minkä vuoksi näytteenotto keväällä vaikuttaisi hyvältä vaihtoehdolta.

Franzluebbersin ym. (2004) mukaan maanäytteen kuivaamislämpötila vaikuttaa merkittävästi uudelleenkastelun jälkeisen hiilidioksidipulssin suuruuteen. Tutkimuksessa parhaat korrelaatiot typen vapautumisen kanssa saavutettiin kuivaamalla maanäytteet joko 40 tai 60 °C asteessa. Maanäytteiden varastoinnin vaikutuksesta menetelmän tarkkuuteen ei ole julkaistua tutkimusta.

### 3.5 SOVELTUVUUS SUOMEN OLOSUHTEISIIN

Soil Health Toolin käyttökelpoisuudesta suomalaisen maaperän typen vapautumisen arvioimisessa ei ole julkaistua tutkimusta. Suurin osa menetelmää käsittelevästä tutkimuksesta on toteutettu pohjois-amerikkalaisilla maaperillä (Franzluebbers ym. 1996, Franzluebbers ym. 2000, Haney ym. 2001, Haney ym. 2008, Schomberg ym. 2008, Bustamonte ja Hartz 2015, Moore ym. 2016), ja näistä useimmat USA:n eteläisissä osavaltioissa. Erot Suo-

men ja julkaistussa tutkimuksessa tutkittujen alueiden ilmastossa ovat hyvin merkittäviä. Suomessa vuotuinen keskilämpötila vaihtelee alueittain -2 - +6 °C välillä ja vuotuinen sademäärä 400-750 mm välillä (Ilmatieteen laitos 2015), kun Teksasissa, jossa suuri osa tutkimuksesta on tehty, vuotuinen keskilämpötila on +20 °C ja sademäärä noin 850 mm (Weatherbase 2016). Lämpötila ja kosteus vaikuttavat huomattavasti hiilen ja typen vapautumiseen maaperässä (Leiros ym. 1999, Franzluebbers ym. 2001).

Franzluebbers ym. (2000) tutkivat hiilidioksidipulssin ja eri orgaanisten fraktioiden suhteita neljällä erilaisella ilmastollisella alueella; Alberta ja Brittiläinen Kolumbia: kylmä-kuiva, Maine: kylmä-kosteaa, Teksas: kuuma-kuiva, Georgia: kuuma-kosteaa. Albertassa ja Brittiläisessä Kolumbiassa vuotuinen keskilämpötila on +2 °C ja vuotuinen sademäärä 500 mm, Mainessa vastaavat luvut ovat +7 °C ja 1100 mm (Franzluebbers ym. 2000). Ilmastollisesti Alberta ja Brittiläinen Kolumbia vastaavat melko hyvin Pohjois-Suomea, Mainen ollessa hieman Etelä-Suomea lämpimämpi ja merkittävästi sateisempi. Franzluebbersin ym. (2000) tutkimuksessa  $CMIN_{0-3d}$ :n ja  $NMIN_{0-24d}$ :n suhde alueiden sisällä vaihteli huomattavasti alueiden välillä. Albertassa ja Brittiläisessä Kolumbiassa  $CMIN_{0-3d}/NMIN_{0-24d}$  oli 23, Mainessa 8, Teksasissa 10 ja Georgiassa 11. Kylmän ja kuivan ilmaston alueella typpeä vapautui yli kaksi kertaa vähemmän hiilidioksidiksi kuin muilla alueilla. Franzluebbers ym. (2000) arvioivat tämän johtuvan typen suuremmasta pidättymisestä ja suuresta osittain hajonneen orgaanisen aineen osuudesta. Tällaisenaan Albertan ja Brittiläisen Kolumbian typen vapautuminen oltaisiin ennustettu muiden alueiden  $CMIN_{0-3d}/NMIN_{0-24d}$ -suhteiden pohjalta huomattavasti todellista suuremmaksi. Koska Mainen ja Teksasin  $CMIN_{0-3d}/NMIN_{0-24d}$ -suhde oli kuitenkin melko samansuuruinen, Franzluebbersin ym. (2000) tulosten perusteella voisi olla mahdollista että menetelmä soveltuu paremmin Etelä-Suomen olosuhteisiin. Tutkimuksessa ei käytetty maaperän WEOC/WEOON-suhdetta, jota Soil Health Tool käyttää typen pidättymisen vaikutuksen huomioimiseen.

Franzluebbers ym. (2001) tutkivat saman aineiston pohjalta lämpötilan ja sademäärän vaikutusta maan orgaanisen hiilen pitoisuuteen (OC), mikrobibiomassan sisältämään hiileen, hiilen vapautumiseen, maaperän perushengitystasoon ja typen vapautumiseen. Tutkimuksen mukaan kylmillä alueilla maan orgaanisen hiilen pitoisuus on suurempi kuin lämpimillä alueilla, mutta lämpimillä alueilla mikrobibiomassahiilen, hiilen vapautumi-

sen ( $CMIN_{0-3d}$  ja  $CMIN_{0-24d}$ ), perushengityksen ja typen vapautumisen suhteet kokonaishiilipitoisuuteen ovat huomattavasti korkeammat, eli suurempi osa maaperän hiilestä on aktiivisissa orgaanisissa fraktioissa. Vuotuinen sademäärä vaikutti aktiivisten fraktioiden suhteisiin kokonaishiilipitoisuuden kanssa vähemmän kuin lämpötila. Perusmaahengitystason ja mikrobibiomassahiilen suhteet kokonaishiileen olivat  $23 \pm 15$  % pienempiä kosteilla kuin kuivilla alueilla, mutta  $CMIN_{0-3d}/OC$  kasvoi sademäärän kasvaessa. Kosteammilla alueilla suurempi osa maaperän hiilestä oli helposti hajoavaa.  $NMIN_{0-24d}/OC$  kasvoi sademäärän lisääntyessä kylmillä alueilla mutta vaikutusta ei havaittu kuumilla alueilla. Ilmastotekijät vaikuttivat myös mikrobibiomassan aktiivisuuteen: Hiilen ja typen vapautumisten suhteet mikrobibiomassahiileen olivat  $20 \pm 10$  % pienemmät kuumilla kuin kylmillä alueilla. Samat suhteet pienenevät myös sademäärän vähenyessä. Sademäärä (1-15 %) selitti huomattavasti suuremman osan mikrobibiomassan aktiivisuuden

vaihtelusta kuin lämpötila (1-3 %). Aineiston perusteella kirjoittajat esittivät, että ilmasto vaikuttaa enemmän orgaanisen hiilen aktiivisten fraktioiden kokoon kuin mikrobibiomassan toimintaan. Näin ollen voidaan olettaa että kylmillä alueilla suurempi osuus orgaanisesta aineesta on mikrobeille hankalasti hyödynnettävissä kuin lämpimillä alueilla. Multavuudet ovatkin kylmillä alueilla huomattavasti lämpimiä alueita suurempia.

Hiilidioksidipulssin voimakkuus ja typen vapautuminen riippuvat ilmastosta, mutta olemassa olevasta tutkimuksesta ei voida yleistää mallia ilmaston vaikutuksesta hiilen ja typen vapautumisen suhteelle. Menetelmän soveltuvuuden arvioimiseksi tarvitaan tutkimusta laajalla otannalla suomalaisia maaperänäytteitä oikean  $CMIN/NMIN$ -suhteen määrittämiseksi, ja tämän suhteen vertailemiseen Haneyn (2015) esittelemään suhteeseen sekä Soil Health Toolilla arvioituihin typen vapautumismääriin.

# 4 HAPETON MUHITUS

Hapeton muhitus (anaerobinen inkubointi) on Waringin ja Bremnerin (1964) esittelemä menetelmä potentiaalisesti vapautuvan typen ennustamiseksi (PMN). Menetelmässä PMN:ää arvioidaan mittamalla 7 tai 14 vuorokauden pituisen hapettomissa olosuhteissa tapahtuvan muhituksen aikana vapautuvaa ammoniumtyyppiä ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ).

## 4.1 POTENTIAALISESTI VAPAUTUVAN TYPEN ARVIOINTI

Maanäyte upotetaan veteen, jolloin maahuokokset täyttyvät vedellä, maa menee hapettomaksi ja aerobiset (happea vaativat) mikrobit kuolevat (Waring ja Bremner 1964; Myrold 1987). Mikrobin sisältämä tyyppi ja muut ravinteet vapautuvat hyödynnettäviksi hapettomissa oloissa selviytyville anaerobisille mikrobeille (Griffin 2008), jotka muuttavat kuolleiden mikrobin sisältämän typen ammoniumiksi (Rajendra ja Power 1997). PMN arvioidaan mitatun ammoniumtypen ja lähtötilanteessa mitatun epäorgaanisen typen erotuksen perusteella.

Maan anaerobinen mikrobisto hajottaa kuolleen mikrobibiomassan ja vapauttaa typen valkuaisaineiden pilkkomisen ja ammonifikaation kautta. Pilkkoutumisessa valkuaisaineet hajotetaan aminohapoiksi ja ureayhdisteiksi, ja ammonifikaatiossa edelleen ammoniumiksi (Myrold ja Bottomley 2008). Tyypiyhdisteiden muuntumista nitraatiksi ei tapahdu hapettomissa olosuhteissa, joten pelkkä ammoniumtypen määrittäminen riittää vapautuneen typen määrän mittaamiseksi hapetonta muhitudusta käytettäessä (van Eekeren ym. 2010).

Myrold (1987) osoitti hapettoman muhituksen aikana vapautuvan typen olevan pääosin peräisin mikrobibiomassasta. Tätä testattiin tutkimuksessa vertaamalla hapettoman muhituksen vapauttaman typen lähteitä kloroformifumikaatio-ekstraktiomenetelmään, joka vapautti tyyppiä juuri mikrobibiomassasta. Tutkimuksessa hapettoman muhituksen vapauttama ammoniumtyyppi korreloi voimakkaasti kloroformifumikaatio-uuttomenetelmän vapauttaman ammoniumin kanssa, ja lisäksi isotooppi-leimauksella löydettiin vahva yhteys menetelmien vapauttaman typen alkuperien välillä. Näin ollen

hapettoman muhituksen vapauttaman typen voidaan olettaa olevan peräisin mikrobibiomassasta eli maaperän orgaanisen aineen aktiivisista fraktioista, joiden toiminta liittyy vahvasti luonnonoloissa vapautuvaan tyyppiin (Carter ja Rennie 1982, Doran 1987).

Waring ja Bremner (1964) löysivät tutkimuksessaan vahvan korrelaation ( $r=0,96$ ,  $p<0,001$ ) 14 vuorokauden hapettoman muhituksen aikana vapautuvan ammoniumtypen ja samanpituisen hapellisen muhituksen aikana vapautuvan epäorgaanisen typen välillä. Myöhemmässä tutkimuksessa (Keeney ja Bremner 1966) totesivat vahvan yhteyden ( $r=0,82$ ,  $p<0,001$ ) myös viikon mittaisen hapettoman muhituksen vapauttaman ammoniumin ja englanninraiheinän (*Lolium multiflorum*) typenoton välillä.

Lämpötila vaikuttaa huomattavasti typen vapautumisen nopeuteen ja määrään (Keeney 1982, Leiros ym. 1999, Franzluebbers ym. 2001). Hapettomassa muhituksessa käytetään tyypillisesti korkeampaa lämpötilaa (40 °C) kuin hapellisessa muhituksessa (20-30 °C) (Curtin ja Campbell 2008), mikä mahdollistaa nopeamman typen vapautumisen ja lyhyemmän muhitusajan (Keeney 1982).

## 4.2 MENETELMÄN KUVAUS

Curtinin ja Campbellin (2008) kuvaavat standardoidun tavan hapettomaan muhitukseen. Kokeessa seulotaan 4 mm seulan läpi maata, jota asetetaan 5 g koeputkeen, johon lisätään 10 ml vettä. Putki suljetaan ilmatiiviisti ja näytettä muhitetaan 7 vuorokautta tasaisessa +40 °C lämpötilassa. Muhituksen jälkeen näytteeseen lisätään 40 ml 2,5 M kaliumkloridia (KCl), näyte sentrifugoidaan 1900 g kiihtyvyydellä ja pinnalle erottunut nestejäte suodatetaan. Suodatetusta nesteestä määritetään ammoniumtypen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) määrä. Vapautuneen typen määrä lasketaan hapettoman muhituksen jälkeisen mitatun ammoniumtypen ja muhittamattoman vertailunäytteen sisältämän ammoniumtypen määrien erotuksena.

Joissain tutkimuksissa käytetään myös Waringin ja Bremnerin (1964) alun perin käyttämää menetelmää, jossa muhituksen kesto on 14 vuoro-

kautta ja muhituslämpötila 30 °C. 7 vuorokauden muhituksen ja 40 °C lämpötilan esittelivät Keeney ja Bremner (1966).

Eurofins Viljavuuspalvelu sisällyttää mikrobiologisen aktiivisuuden laajaan ravinnetila-analyysiin. Mikrobiologinen aktiivisuus perustuu hapetomaan muhitukseen, mutta muhituksen sijasta potentiaalisesti vapautuva typpi arvioidaan lähi-infrapunamenetelmällä (NIR). Siinä maanäytteestä arvioidaan siitä heijastuva lähi-infrapunaspektri. Spektriä käytetään korreloimaan tulokset typen vapautumiskoesarjojen kanssa ja tuotetaan ennuste typen vapautumisesta. Hollantilaisien koesarjojen (n=400) perusteella menetelmä vastaa hyvin 7 päivän hapettoman muhituksen typen vapautumista ( $R^2=85\%$ ) ja kohtalaisesti ( $R^2=67\%$ ) kahdeksan viikon hapellisen muhituksen tuloksia (Hanegraaf ym. 2005). Hollantilaisen aineiston perusteella tehdyssä luokittelussa hyvä typen vapautumistaso olisi 90-134 mg/kg hietamailla, 220-289 mg/kg multailla ja 115-169 mg/kg muilla maalajeilla (Hanegraaf ym. 2005). (Jos hehtaarin 15-20 cm paksun ruokamultakerroksen oletetaan painavan 2000 t/ha, typen vapautumismäärät ovat huomattavan suuria, luokkaa 200-500 kg N/ha.)

### 4.3 MENETELMÄN TARKKUUS

Waring ja Bremner (1964) tutkivat ensimmäisinä typen vapautumisen arviointia hapettomalla muhituksella. He vertailivat tutkimuksessa 30 °C:ssä kahden viikon hapettoman muhituksen aikana vapautuvan ammoniumtypen ja samassa lämpötilassa samanpituisen hapellisen muhituksen aikana vapautuvan ammonium-, nitriitti- ja nitraattitypen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) suhdetta. Tutkimuksessa käytetyt maanäytteet (n=39) kerättiin Queenslandin alueen viljelymailta. Aineiston perusteella menetelmät korreloivat keskenään voimakkaasti ( $r=0,96$ ,  $p<0,001$ ). Kirjoittajat suosittelivat hapettoman muhituksen käyttöönottoa potentiaalisesti vapautuvan typen arviointimenetelmänä vedoten sen helppouteen ja nopeuteen verrattuna hapelliseen muhitukseen.

Keeney ja Bremner (1966) tutkivat erilaisten muhitusmenetelmien ja kemiallisten menetelmien tarkkuutta potentiaalisesti vapautuvan typen (PMN) arvioinnissa vertailemalla menetelmiä englanninraiheinän (*Lolium multiflorum*) typenottoon kasvihuoneolosuhteissa. Hapetonta muhitusta tutkittiin käyttämällä Waringin ja Bremnerin (1964) esittelemää menetelmää (14 vrk / 30 °C) ja tästä kehitettyä muunnosta (7 vrk / 40 °C). Englanninraiheinää niitettiin kasvihuonekokeen aikana kolme

kertaa. Ensimmäisessä leikkuussa kerätyn kasvuston sisältämä typpi korreloi voimakkaasti maaperänäytteiden sisältämän epäorgaanisen typen kanssa, minkä vuoksi kirjoittajat vertailivat potentiaalisesti vapautuvan typen arviointimenetelmien tuloksia toisessa ja kolmannessa niitossa kerättyjen kasvustojen sisältämään tyypeen. Maanäytteiden esikäsittely vaikutti merkittävästi muhitusten aikana vapautuvaan tyypeen: Kuivaaminen huoneenlämmössä lisäsi huomattavasti  $\text{ANA}_{30\text{C}}$ :n aikana vapautuneen typen määrää mutta laski hieman  $\text{ANA}_{40\text{C}}$ :n aikana vapautuneen typen määrää. Kuivattujen näytteiden varastointi lisäsi vapautuneen typen määrää molemmilla menetelmillä 24 viikkoon asti, jonka jälkeen varastoinnin jatkaminen vähensi vapautuneen typen määrää.  $\text{ANA}_{30\text{C}}$  korreloi kasvuston typenoton kanssa maanäytteen esikäsittelystä riippuen korrelaatiokertoimilla 0,38-0,59 ja  $\text{ANA}_{40\text{C}}$  korrelaatiokertoimilla 0,71-0,82. 14 vuorokauden hapellisen muhituksen korrelaatiokertoimet vaihtelivat välillä 0,63-0,81. Parhaimmat korrelaatiot saavutettiin  $\text{ANA}_{40\text{C}}$ :llä käyttämällä peltokosteudessa olevaa maanäytettä sekä kuivattua ja 48 viikkoa varastoitua maanäytettä (molemmilla  $r=0,82$ ,  $p<0,001$ ). Kirjoittajat pitivät tulosten perusteella hapellista muhitusta ja 7 vrk / 40 °C hapetonta muhitusta parhaimpina menetelminä potentiaalisesti vapautuvan typen arvioimiseen.

Curtin ja McCallum (2004) tutkivat erilaisten vapautuvan typen (PMN) arviointimenetelmien suhdetta kauran (*Avena sativa* L.) typenottoon kasvihuoneolosuhteissa. Tutkimuksessa käytetyt maanäytteet kerättiin eri puolilta Uutta-Seelantia hyvin vaihtelevan käyttöhistorian pelloilta. Tulosten perusteella  $\text{ANA}_{40\text{C}}$  ei korreloinut 28 vuorokauden hapellisen muhituksen kanssa ( $r^2=0,11$ ).  $\text{ANA}_{40\text{C}}$ :llä vapautui keskimäärin huomattavasti enemmän tyyppiä (73 mg/kg) kuin hapellisella muhituksella (33 mg/kg).  $\text{ANA}_{40\text{C}}$ :llä arvioitun potentiaalisesti vapautuvan typen ja maanäytteiden sisältämän epäorgaanisen typen yhdistetty suhde kauran typenottoon ei ollut vahva ( $r^2=0,55$ ,  $p<0,01$ ). Tutkimuksessa määritettiin myös maaperästä vapautuneen typen osuus kasvuston tyypestä, mutta  $\text{ANA}_{40\text{C}}$  selitti sitä heikosti ( $r^2=0,32$ ,  $p<0,01$ ). Hapellisen muhituksen korrelaatiot kasvuston typenoton kanssa olivat vahvat. Tutkimuksen tulosten perusteella kirjoittajat esittävät, että hapeton muhitus soveltuu potentiaalisesti vapautuvan typen määrän karkeaan arviointiin, muttei ole riittävän tarkka antamaan luotettavia lukuarvoja vapautuvan typen määrästä.

Soon ym. (2007) tutkivat erilaisten potentiaalisesti vapautuvan typen (PMN) arviointimenetelmien tarkkuutta ja niiden herkkyyttä viljelykäytäntö-

jen vaikutuksille. Tarkkuutta tutkittiin vertailemalla arviointimenetelmien antamien tulosten variaatiokerroimia.  $ANA_{40C}$  arvioitiin tarkemmaksi (variaatiokerroin 12,8 %) kuin 24 vuorokauden hapellinen muhitus (variaatiokerroin 17,4 %). Muhitusmenetelmät korreloivat keskenään vahvasti ( $R^2=0,901$ ,  $p<0,001$ ). Menetelmien herkkyyttä viljelykäytäntöjen vaikutuksille arvioitiin käyttämällä maanäytteitä koepelloilta, joita oltiin viljelty erilaisilla viljelykierroilla, muokkaustavoilla ja kalkitusmäärillä. Viljelykierron vaikutus  $ANA_{40C}$ :een ei ollut merkitsevä 0-15 cm syvyydestä kerätyillä näytteillä ( $p=0,21$ ) mutta oli 0-5 cm syvyydestä kerätyillä näytteillä ( $p=0,001$ ). Hapeton muhitus osoittautui herkkimmäksi menetelmäksi havaitsemaan vaihteluita viljelykierrossa. Myöskään muokkaustavan vaikutus  $ANA_{40C}$ :een ei ollut merkitsevä 0-15 cm syvyydestä mitattuna ( $p=0,54$ ). Tarkkuus parani 0-5 cm syvyydestä kerätyillä näytteillä käyttämällä ( $p=0,1$ ), mutta vaikutus ei ollut tässäkin syvyydessä merkitsevä. Hapellinen muhitus ( $p=0,01$ ) ja kaliumkloridilla uutettu typpi ( $p=0,05$ ) havaitsivat muokkaustavan vaikutuksen  $ANA_{40C}$ :tä tarkemmin. Kalkituksen vaikutus  $ANA_{40C}$ :een ja hapelliseen muhituksen oli merkitsevä (molemmilla  $p=0,01$ ). Kirjoittajien mukaan hapellinen muhitus oli testatuista menetelmistä herkin viljelykäytäntöjen vaikutukselle, mutta myös hapeton muhitus oli menetelmänä riittävän tarkka havaitsemaan muutoksia.

Schomberg ym. (2009) vertailivat erilaisia potentiaalisesti vapautuvan typen arviointimenetelmiä keskenään ja tutkivat saataisiinko eri menetelmien tuottamaa tietoa yhdistelemällä tarkempia arvioita. Arviointimenetelmiä vertailtiin 41 viikon hapellisen muhituksen aikana vapautuneeseen tyypeen.  $ANA_{40C}$  korreloi voimakkaasti maaperän kokonaishiilen ( $R^2=0,86$ ) ja kokonaistypen ( $R^2=0,84$ ) sekä  $NMIN_{2-41wk}$  ( $R^2=0,88$ ) kanssa. Kaikki korrelaatiot olivat merkittäviä ( $p<0,001$ ). Tutkituista menetelmistä  $ANA_{40C}$  ja 24 vuorokauden hapellinen muhitus olivat tarkimmat mittarit potentiaalisesti vapautuvalle tyyppelle.

Nyiraneza ym. (2009) tutkivat erilaisten potentiaalisesti vapautuvan typen arviointimenetelmien ja maaperän ominaisuuksien korrelaatioita ja kykyä ennustaa maissin (*Zea mays* L.) sadontuottoa ja typenottoa Quebecissä Kanadassa. Tutkimuksessa  $ANA_{40C}$  korreloi vahvasti maissin kuiva-aine-sadon ( $R^2=0,85$ ,  $p<0,0001$ ) sekä typenoton ( $R^2=0,79$ ,  $p<0,0001$ ) kanssa. Myös korrelaatiot maaperän kokonaistypen ja -hiilen kanssa olivat vahvoja. Kahdena perättäisenä tutkimusvuotena  $ANA_{40C}$  selitti 57 % ja 74 % satotason vaihtelusta ja 55 % ja 63 % kasvuston typenoton vaihtelusta.

Morrow ym. (2016) vertailivat erinäisten maaperän kunnan arviointityökalujen käyttökelpoisuutta ja tarkkuutta erilaisilla maaperillä ja viljelykäytännöillä. Potentiaalisesti vapautuvan typen arvioinnissa käytettiin menetelmänä 28 vuorokauden hapetonta muhitusta 40 °C:ssä. Hapeton muhitus mittasi merkitseviä eroja erilaisten viljelykäytäntöjen (luonnonmukainen - tavanomainen, suora-kierto - tavanomainen muokkaus, viljelykierto - ei kiertoa) välillä. Lisäksi kirjoittajat arvioivat menetelmien kykyä mitata maaperän kuntoa seitsemän kriteerin pohjalta: 1) tutkittuun tietoon pohjautuva 2) havaitsee muutoksia 3) käytännöllinen toteuttaa 4) tarkka 5) kustannustehokas 6) toteutettavissa paikan päällä ja 7) antaa viljelijälle käyttökelpoista tietoa. Kriteereitä arvioitiin kolmiportaisella hyvä-keskiverto-heikko -asteikolla. Näistä kriteereistä hapeton muhitus todettiin hyväksi tutkittuun tietoon pohjautuvuuden ja viljelijälle käyttökelpoisen tiedon osalta. Sen heikkouksiksi taas katsottiin toteutuksen käytännöllisyys ja paikan päällä toteutettavuus.

## 4.4 SOVELTUVUUS SUOMEN OLOSUHTEISIIN

Hapettoman muhituksen tarkkuudesta potentiaalisesti vapautuvan typen määrittämisessä suomalaisilla maaperillä ei ole julkaistu vertaisarvioitua tutkimusta. Kokkonen ja Aura (2006) ovat käyttäneet MTT:n ”Typenkäytön hallinta karjatiljoilla sekä mallasohran ja avomaan puutarhakasvien viljelyssä” -hankkeessa hapetonta muhitusta vertailumenetelmänä fosfaateilla puskuroitujen muhitusten tarkkuuden arvioimiseen. Vaikka hapettoman muhituksen käyttämistä potentiaalisesti vapautuvan typen mittarina ei ole tutkittu Suomessa, sitä pidetään yleisesti suhteellisen tarkkana menetelmänä typen vapautumisen arvioimisessa (Leppänen ja Esala 1995, Kokkonen ja Aura 2006, Kokkonen ym. 2006); menetelmän haasteeksi koetaan lähinnä sen vaatima pitkä muhitusaika. Suomen ulkopuolella hapettomasta muhituksesta on julkaistu paljon tutkimusta hyvin vaihtelevilla maaperillä eri ilmastollisilta alueilta, ja näissä tutkimuksissa sillä on saatu hyviä tuloksia (Keeney ym. 1966, Soon ym. 2007, Schomberg ym. 2009, Mariano ym. 2013).



## 4.5 NÄYTTEENOTTOAJANKOHDAN JA NÄYTTEEN KÄSITTELYN VAIKUTUKSET

Lindénin ym. (1992) tutkimuksessa kivennäistypen kertyminen lannoittamattomilla muovilla peite-tyillä kesantoaloilla oli lähes lineaarista huhtikuun loppupuolelta elokuun loppuun. Peittämättömillä aloilla kivennäistypen kertyminen vaihteli enemmän, oletettavasti sadannan vaikutuksen vuoksi (Lindén ym. 1992). Tämän ajanjakson aikana ote-tuista näytteistä typen vapautumisen mittaami-nen hapettomalla muhituksella antaisi luultavasti melko tarkan arvion peltolohkon kasvukauden ai-kaisesta potentiaalisesti vapautuvasta tpeestä. Vii-  
 kon mittaisen muhituksen vaativan menetelmän tulokset eivät huhtikuun loppupuolella kerätyillä näytteillä ehtisi viljelijän käytettäväksi kylvölan-noitukseen mennessä, mutta menetelmän antamia tuloksia voisi käyttää täydennyslannoituksen suun-nittelussa.

Lindénin ym. (1992) tutkimuksessa 15 % kasvu-  
 kauden aikaisesta typen vapautumista tapahtui al-  
 kukevään ja ohran (*Hordeum vulgare*) orastumisen  
 välisenä ajanjaksona, 45 % orastumisen ja tähkälle  
 tulon välillä, ja 40 % tähkälle tulon ja tuleentumi-

sen välillä. Aikaisin keväällä mitatut arviot typen vapautumisesta saattavat siis ennustaa kasvukau-den vapautumista todellista pienemmäksi. Tämän vuoksi näytteidenotto hapetonta muhitusta varten kannattanee ajoittaa mahdollisimman myöhäiseen kevääseen kuitenkin niin, että tulokset ehtivät vilje-lijälle lannoituspäätösten tekemisen tueksi.

Maanäytteen kuivaus ja varastointi vaikuttavat huomattavasti hapettomalla muhituksella saata-viin tuloksiin (Keeney ja Bremner 1966). Keeney ja Bremnerin (1966) tutkimuksessa huoneenläm-mössä kuivaus nosti ANA<sub>30C</sub>:llä vapautuvan typen määrää mutta laski hieman ANA<sub>40C</sub>:llä vapautu-  
 vaa tyyppiä. Ilmakuivatun maanäytteen varastointi nosti vapautuvan typen määrää molemmilla me-  
 netelmillä 24 viikkoon asti minkä jälkeen vapau-  
 tumisen määrä alkoi laskea. Tarkimmat tulokset suhteessa kasvuston typenottoon saatiin ANA<sub>40C</sub>:llä käyttämällä peltokostea tai 48 viikkoa säilytet-tyä maanäytettä ja ANA<sub>30C</sub>:llä käyttämällä viikon tai 16 viikkoa säilytyksessä ollutta maanäytettä. Beauchampin ym. (1986) mukaan näytteiden pa-  
 kastaminen voi lisätä hapettoman muhituksen ai-  
 kana vapautuvan typen määrää, mutta useimmissa tutkimuksissa pakastamisen vaikutukset ovat olleet merkittävästi kuivaamisen vaikutuksia pienempiä (Øien ym. 1974, Beachamp ym. 1986).

## 5 KOKEMUKSIA MENETELMIEN SOVELTAMISESTA OSMO-HANKKEEN KOELOHKOILLA

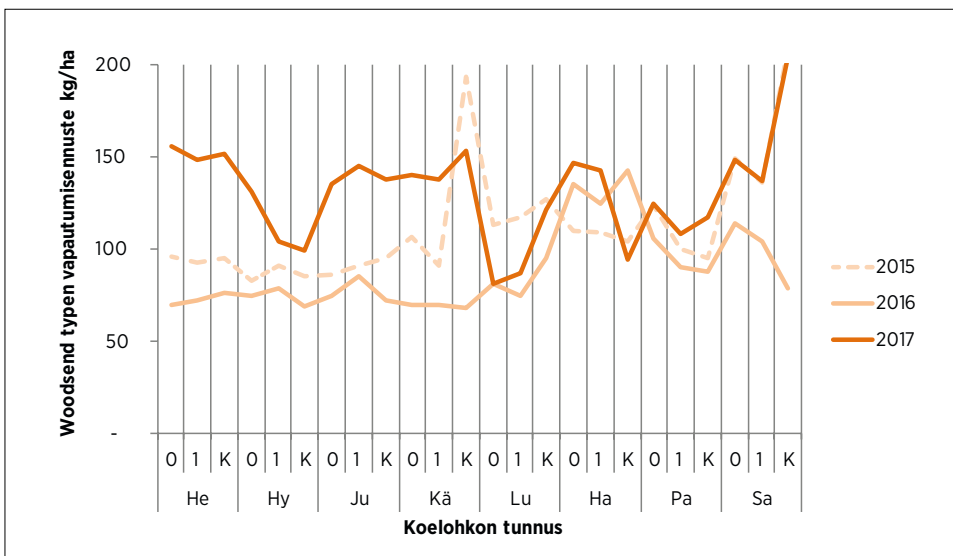
### 5.1 AINEISTO JA MENETELMÄT

OSMO-hankkeen koelohkoilta (n=24) kerättiin maanäytteet syksyinä 2015, 2016 ja 2017. Maanäytteet kuivattiin huoneenlämmössä ohueksi kerroksi levitettynä ja puhaltimella ilmaa kierrättäen ja lähetettiin Woods End Laboratories -yritykseen Soil Health Tool analyysiin. Analyysi sisälsi Solvita CO<sub>2</sub>-burst-, liukoinen aminotyyppi-, vesiliukoinen hiili- ja nitraattimääritykset sekä ennusteen kasveille käyttökelpoisen typen määrästä. Tämän lisäksi laskettiin typen vapautumisennuste Haney ym. 2018 kaavalla (1).

Samoilta lohkoilta otettiin maanäytteet huhtitoukokuussa 2016, 2017 ja 2018. Näytteistä määritettiin ammonium- ja nitraattityppi Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:ssä. Lohkoilta kerättiin myös kasvinäytteet, joista määritettiin kokonaistyyppi-pitoisuus Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:ssä (Eurofins Agro Oy:ssä).

### 5.2 VUOSIEN VÄLINEN VAIHTELU TYPEN VAPAUTUMISENNUSTEES- SA JA MAAPERÄN LIUKOISESSA TYPESSÄ

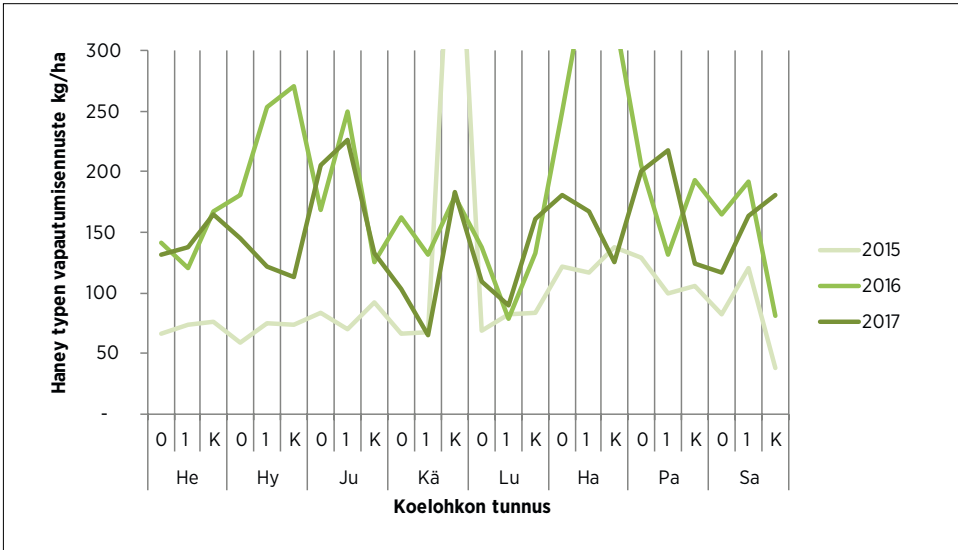
Koelohkojen välillä oli merkittävää vaihtelua typen vapautumisennusteissa sekä Woods Endin kaupallisella menetelmällä määritettynä (Kuva 1), että Haney -menetelmällä määritettynä (kaava 1, Kuva 2). Typen vapautumisennuste oli alimmillaan 72 kg/ha ja ylimmillään 204 kg/ha Woods Endin menetelmällä. Haneyn menetelmällä vaihtelu oli suurempaa, 32-480 kg/ha. Myös samalla loholla vaihtelu vuosien välillä oli merkittävää, Woods Endin menetelmällä 125 kg/ha ja Haneyn menetelmällä 305 kg/ha. Haneyn menetelmä reagoi voimakkaammin vaihteluun Solvita hiilidioksidintuotossa, joten vaihtelu oli suurempaa.



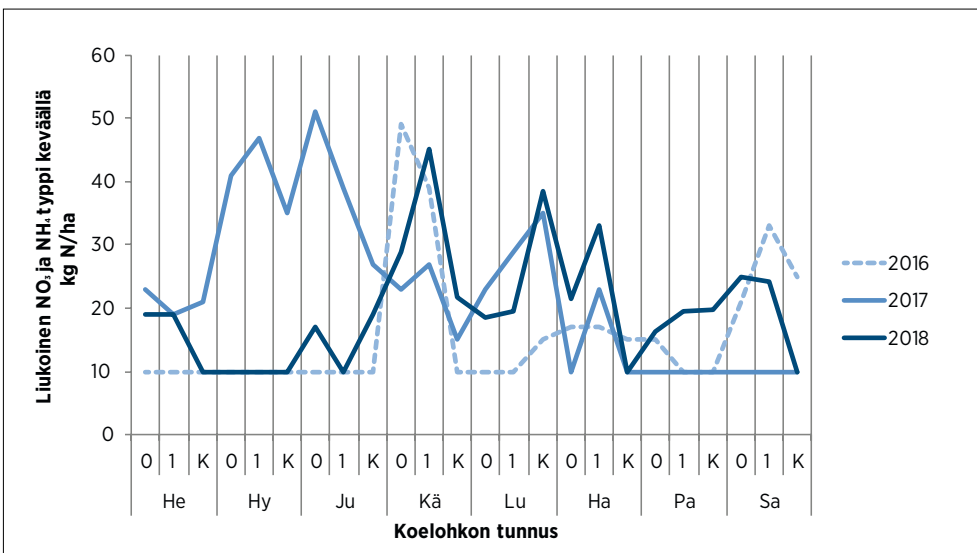
Kuva 1. Woods End -menetelmällä laskettu typen vapautumisennuste 24 koelohkolla kolmen vuoden ajalta.

Suuri vaihtelu lohkojen hiilidioksidintuotossa vuosien välillä on ongelma mikrobiaktiivisuuden käytössä maan kasvukunnon mittarina. Viljavuus-analysinäytteet otetaan tyypillisesti viiden vuoden välein. Jos vuoden olosuhteet vaikuttavat merkittävästi tuloksiin, yhden vuoden tulokset eivät kuvaa lohkon yleisiä ominaisuuksia.

Liukoista epäorgaanista typpeä oli useimmilla lohkoilla keväällä alle määritysrajan (Kuva 3). Suurimmat typpipitoisuudet olivat kytköksissä edellisvuoden viherlannoitukseen (Hy ja Ju lohkot keväällä 2017), eloperäiseen lannoitukseen (Kä lohkot keväällä 2018) tai perunanviljelyyn (Lu lohkot 2017, 2018).



**Kuva 2.** Haney -menetelmällä laskettu typen vapautumisennuste 24 koelohkolle kolmen vuoden aikana.



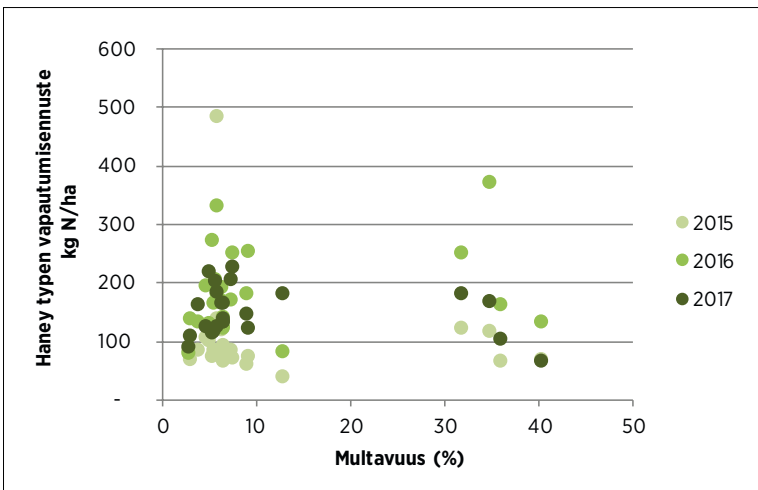
**Kuva 3.** Liukoisen epäorgaanisen typen määrä 24 koelohkolla 3 vuoden aikana. Alle mittausrajan olevissa tuloksissa oletettiin puolet mittausrajasta, eli 10 kg/ha.

### 5.3 VASTAAVUUS TYPEN VAPAUTUMISENNUSTEEN, MULTAVUUDEN JA LIUKOISEN TYPEN VÄLILLÄ

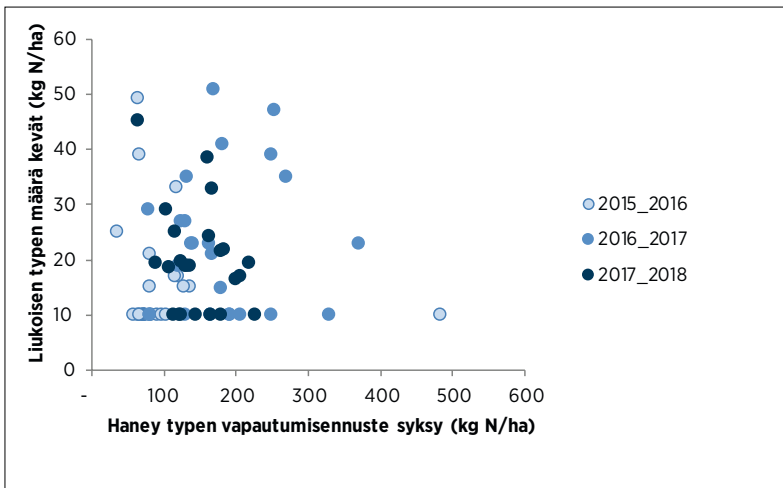
Tulosten perusteella multavuuden ja typen vapautumisennusteen välillä oli vain heikko yhteys (Kuva 4). Alhaisella multavuudella ja joidenkin vuosien kohdalla (2017) yhteys oli voimakkaampi, mutta toisaalta eri vuosina yhteys saattoi jopa kääntyä

päinvastaiseksi. Mikrobiaktiivisuus vaikuttaisi olevan siis multavuudesta riippumaton tekijä.

Seuraavan kevään typpipitoisuutta ei voinut ennustaa edellissyksyn typen vapautumisennusteen perusteella. Alhaisia typpipitoisuuksia löytyi lohkoilta, joissa typen vapautumisennuste oli välillä 59-480 kg/ha. Mikrobiaktiivisuuden ja hiili:typpisuhteen lisäksi muut tekijät, kuten typen pidättyminen, huuhtoutuminen tai denitrifikaatio vaikuttavat keväällä ruokamultakerroksessa mitattaviin typpipitoisuuksiin.



**Kuva 4.** Multavuuden ja typen vapautumisennusteen välinen yhteys 24 koelohkolla kolmen vuoden seurantajakson aikana.

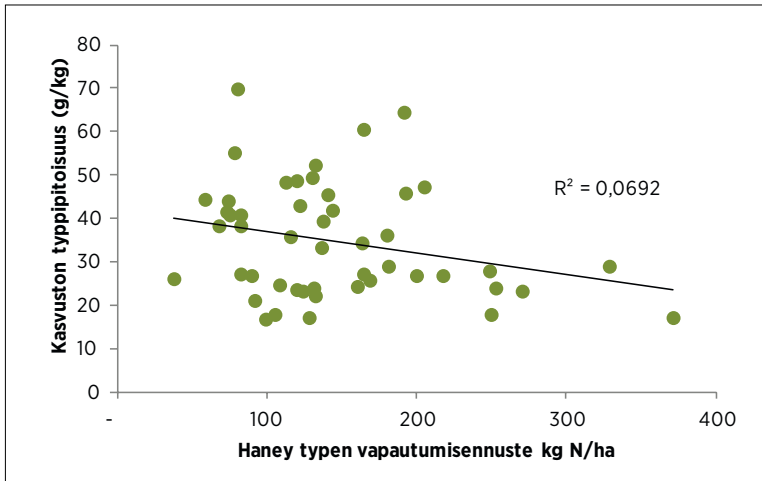


**Kuva 5.** Liukoisin typen määrän riippuvuus edellissyksyn typen vapautumisennusteesta (24 koelohkoa, 3 koevuotta).

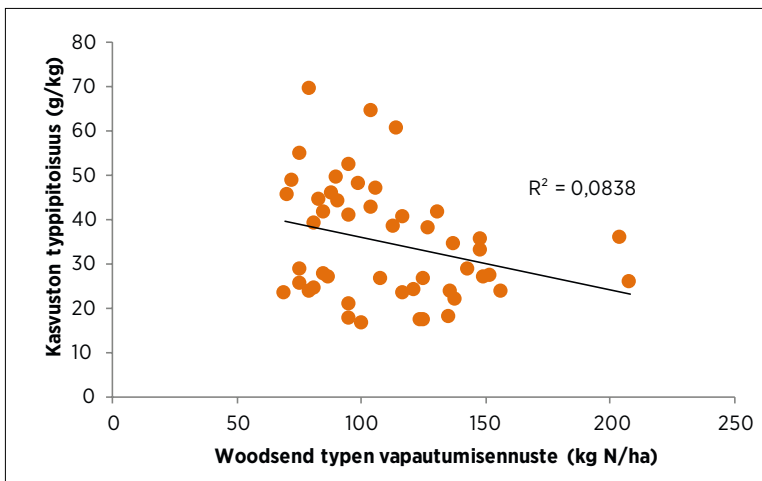
## 5.4 VASTAAVUUS TYPEN VAPAUTUMISENNUSTEEN JA KASVUSTON TYPPIPITOISUUDEN VÄLILLÄ

Kumpikaan typen vapautumisennuste ei selittänyt kasvuston typpipitoisuutta (Kuva 6; Kuva 7). Ai-

neistoa ei kerätty kokonaistypenotosta eikä lannoituksesta, joten lohkoille ei voitu laskea typpitasetta. Toisaalta typpipitoisuudet olivat pääosin tasolla, joka oli kasveille riittävä. Tulosten perusteella muut tekijät vaikuttivat enemmän typpipitoisuuteen (kasvin ravinteiden otto, esikasvi, lannoitus).



**Kuva 6.** Kasvuston typpipitoisuus ei riippunut Haney -menetelmällä lasketusta typen vapautumisennusteesta.



**Kuva 7.** Kasvuston typpipitoisuus ei riippunut Woods End -menetelmällä lasketusta typen vapautumisennusteesta.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kirjallisuuskatsauksen perusteella uudet menetelmät typen vapautumisen arvioimiseksi vaikuttavat hyvin lupaavilta käytössä oleviin menetelmiin verrattuna. Molemmilla tällä hetkellä käytössä olevista menetelmistä (maaperän multavuusluokat, liukoisen typen mittaaminen) on yhteys typen vapautumiseen, mutta ne eivät suoranaisesti mittaa sitä tai sen taustalla olevia tekijöitä. Liukoinen epäorgaaninen typpi mittaa vapautumisen lopputuotteita, mutta niiden voimakkaasti vaihtelevien pitoisuuksien ja suuren huuhtoutumisalttiuden vuoksi yhteys typen vapautumiseen jää usein heikoksi. Maaperän orgaanisen aineen pitoisuus taas korreloi useissa tutkimuksissa voimakkaasti typen vapautumisen kanssa, mutta muutosten hitauden vuoksi se ei kykene havaitsemaan nopeampia vaihteluita typen vapautumisessa.

Tässä katsauksessa käsitellyn kirjallisuuden perusteella molemmat uusista menetelmistä korreloivat hyvin typen vapautumisen kanssa. Soil Health Toolin mittaaman kuivauksen ja uudelleenkasvatelun tuottaman hiilidioksidipulssin suhde typen vapautumiseen on osoitettu useissa tutkimuksissa vahvaksi. Myös maaperän hiili-typpi-suhteen sisällyttäminen menetelmään typen pidättymisen huomioimiseksi on perusteltua, vaikka vesiliukoisen hiilen ja typen käyttämistä aineiden kokonaispitoisuuksien sijasta on tutkittu hyvin vähän. Vaikka Soil Health Toolin yhteys typen vapautumiseen on vahva, hiilidioksidintuotannon ja typen vapautumisen suhde vaikuttaa vaihtelevan alueellisista ja ilmastollisista tekijöistä riippuen. Tämän myötä Soil Health Toolilla saadut ennusteet typen vapautumisesta voivat korrelaatioiden vahvuudesta huolimatta vaihdella tarkkuudeltaan huomattavasti.

Hapeton muhitys vaikutti tarkasteltujen tutkimuksien perusteella tarkemmalta arviointimenetelmältä typen vapautumisen ennustamiseksi. Tutkimuksissa havaitut korrelaatiot hapellisella muhituksella mitattuun typen vapautumiseen ja kasvuston typenottoon olivat hyvin vahvoja. Mene-

telmä on myös melko herkkä havaitsemaan muutoksia viljelykäytännöissä. Hapetonta muhitusta koskevaa tutkimusta on tehty runsaasti hyvin erilaisilla maaperillä ja sitä pidetään yleisesti hyväksi havaittuna menetelmänä potentiaalisesti vapautuvan typen arvioimiseen. Hapettoman muhituksen vaatima vähintään 7 vuorokauden pituinen muhitusaika voidaan kuitenkin nähdä ongelmallisena menetelmän laajemman kaupallisen käyttöönoton kannalta. Viimeaikainen kehitys, jossa hapettoman muhituksen tuloksia ennustetaan infrapunaspektrin avulla nopeuttaa analyysitulosten saantia. Toisaalta menetelmään liittyy epävarmuutta siitä, kuinka hyvin alkuperäinen (hieta- ja turvemaiilla tehty) kalibrointikosarja vastaa suomalaisia olosuhteita.

Molempien kirjallisuuskatsauksessa esiteltyjen menetelmien tieteellinen pohja on osoittautunut käsitellyssä tutkimuksessa vahvaksi. Hapeton muhitys on menetelmistä tarkempi ennustamaan typen vapautumista ja tarjoaa melko luotettavan vaihtoehdon pidempikestoisille hapelliselle muhitukselle. Soil Health Toolilla saadut tulokset eivät ole yhtä tarkkoja, mutta toisaalta menetelmän vaatima aika on huomattavasti lyhyempi, mikä helpottaa menetelmän kaupalliseen käyttöön ottamista. Soil Health Toolin tarkkuutta voisikin olla mielekkäämpää vertailla hapettoman muhituksen sijaan muihin lyhytkestoisiin typen vapautumisen arviointimenetelmiin.

OSMO –hankkeen koelohkoilla vuosien välinen vaihtelu oli merkittävää. Toisaalta vaihtelu oli jäljitettävissä lohkoilla tehtyihin toimenpiteisiin. Tulosten perusteella Soil Health Tool on yksinkertainen tapa havainnoida lohkojen välistä vaihtelua, mutta sen antamia ennusteita typen vapautumisesta ei tule tulkita suoraviivaisesti. Suomen olosuhteissa menetelmien luotettavuutta tulisi tutkia vertailemalla analyysien tuloksia kasvien typen ottoon eri lannoitustasoilla.

## 7 LÄHTEET

- Adu, J. K., ja Oades J. M. 1978. Physical factors influencing decomposition of organic materials in soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry* 10 (2): 109–115.
- Beauchamp, E.G., Reynolds, W.D., Brasche, V.D. ja Kirby, K. 1986. Nitrogen mineralization kinetics with different soil pretreatments and cropping histories. *Soil Science Society of America Journal* 50 (6): 1478–1483.
- Birch, H. 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant Soil* 10: 9–31.
- Birch, H. F. 1960. Nitrification in soils after different periods of dryness. *Plant Soil* 7: 81–96.
- Burford, J. ja Bremner, J. 1975. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 7: 389–394.
- Carter, M. ja Rennie, D. 1982. Changes in soil quality under zero tillage farming systems: distribution of microbial biomass and mineralizable C and N potentials. *Canadian Journal of Soil Science* 62: 587–597.
- Curtin, D. ja Campbell, C. 2008. Mineralizable nitrogen. Teoksessa Carter, M. R. ja Gregorich, E. G. (toim.): *Soil sampling and methods of analysis*. 2. painos. CRC Press, Boca Raton, FL. s. 599–606.
- Curtin, D. ja McCallum, F. M. 2004. Biological and chemical assays to estimate nitrogen supplying power of soils with contrasting management histories. *Australian Journal of Soil Research* 42: 737–746.
- Doran, J. 1987. Microbial biomass and mineralizable nitrogen distributions in no-tillage and plowed soils. *Biology and Fertility of Soils* 5: 68–75.
- Fierer, N. ja Schimel, J. P. 2003. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal* 67: 798–805.
- Fox, R.H. ja Piekielek, W.P. 1984. Relationships among anaerobically mineralized nitrogen, chemical indexes, and nitrogen availability to corn. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1087–1090.
- Franzluebbers, A., Hons, F. ja Zuberer, D. 1994. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1639–1645.
- Franzluebbers, A., Haney, R. L., Hons, F. M. ja Zuberer, D. A. 1996. Determination of microbial biomass and nitrogen mineralization following rewetting of dried soil. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1133–1139.
- Franzluebbers, A. 1999. Potential C and N mineralization and microbial biomass from intact and increasingly disturbed soils of varying texture. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 1083–1090.
- Franzluebbers, A. J., Haney, R. L., Honeycutt, C. W., Schomberg, H. H., ja Hons, F. M. 2000. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal* 64: 613–623.
- Franzluebbers, A. J., Haney, R. L., Honeycutt, C. W., Arshad, M., Schomberg, H. H. ja Hons, F. M. 2001. Climatic influences on active fractions of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1103–1111.
- Franzluebbers, A. J. 2016. Should soil testing services measure soil biological activity? *Agricultural & Environmental Letters* 1.
- Gainey, P. L. 1919. Parallel formation of carbon dioxide, ammonia, and nitrate in soil. *Soil Science* 7: 293–311.
- Griffin, T.S. 2008. Nitrogen availability. Teoksessa Schepers, J. C. ja Ruan, W.R. (toim.): *Nitrogen availability in agricultural systems*. Agronomy Monograph 49. ASA, CSSA ja SSSA. Madison, WI. s. 613–646.
- Halverson, L. J., Thomas M. J., ja Firestone, M. K. 2000. Release of intracellular solutes by four soil bacteria exposed to dilution stress. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1630–1637.
- Hanegraaf, M.C., Den Boer, D.J., Vedder, H.W. ja Reijneveld, J.A., 2005. BFI – an indicator for the biological quality of soils. *Grassland Science in Europe* 10: 515–518.
- Haney, R. L., Franzluebbers, A. J., Hons, F. M. ja Zuberer, D. A. 1999. Soil C extracted with water or K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: pH effect on determination of microbial biomass. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 529–533.

- Haney, R., Hons, F., Sanderson, M. ja Franzluebers, A. 2001. A rapid procedure for estimating nitrogen mineralization in manured soil. *Biology and Fertility of Soils* 33: 100-104.
- Haney, R. L., Brinton, W. H. ja Evans, E. 2008. Estimating soil carbon, nitrogen and phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39: 2706-2720.
- Haney, R. L. ja Haney, E. B. 2010. Simple and rapid laboratory method for rewetting dry soil for incubations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41:1493-1501.
- Haney, R. L., Franzluebers, A. J., Virginia, L. J., Johnson M.-V., Haney, E. B. White, M. J. ja Harmel, R. D. 2012. Soil Organic C:N vs. Water-Extractable Organic C:N. *Open Journal of Soil Science* 2: 269-274.
- Haney, R. L., Haney, E. B., Smith, D. R. ja White, M. J. 2015. Estimating potential nitrogen mineralization using Solvita soil respiration system. *Open Journal of Soil Science* 5: 319-323.
- Haney, R.L., Haney, E.B., Smith, D.R., Harmel, D. ja White M.J., 2018. The soil health tool – theory and initial broad-scale application. *Applied Soil Ecology* 125:162-168.
- Ilmatieteen laitos. 2015. Vuositilastot. <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>. Päivitetty 4.1.2015. Ladattu 2.8.2016.
- Kaasinen, S., Rasa, K., Heikkinen, J., 2010. Typpilannoituksen tarkentaminen. TEHO:n tilakokilu v. 2009. Teho hankkeen raportteja.
- Keeney, D. R. ja Bremner, J. M. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agronomy Journal* 58 (5): 498-503.
- Keeney, D. R. 1982. Nitrogen-availability indices. Teoksessa A.L. Page ym. (toim.): *Methods of soil analysis. Part 2. American society of agronomy ja Soil science society of America, Madison, Wisconsin, USA.* s. 711-733.
- Kokkonen, A ja Aura, E. 2006. Maan mobilisoidun typen testit. Teoksessa Alakukku, L (toim.): *Maaperän prosessit - pellon kunnan ja ympäristönhoidon perusta.* MTT, Jokioinen. s. 95-97.
- Kokkonen, A., Esala, M ja Aura, E. 2006. Acceleration of N mineralization by release of enzymes and substrates from soil mineral particles with phosphates. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 504-508.
- Lebedjantzev, A. N. 1924. Drying of soil, as one of the natural factors in maintaining soil fertility. *Soil Science* 18:419-447.
- Leiros, M., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S. ja Gil-Sotres, F. 1999. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 327-335.
- Leppänen, A ja Esala, M. 1995. Keväisen mineraalityypianalyysin käyttö lannoitustarpeen enustamisessa. *Maatalouden tutkimuskeskuksen tiedote* 1/1995.
- Lindén B., Lyngstad, I., Sippola, J., Søgaaard, K. ja Kjellerup V. 1992. Nitrogen mineralization during the growing season. 1. Contribution to the nitrogen supply of spring barley. *Swedish Journal of Agricultural Research* 22 (1): 3-12.
- Mariano, E., Trivelin, P.C.O., Leite, J.M., Vieira-Megda, M.X., Otto, R. ja Franco, H.C. 2013. Incubation methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37: 450-461.
- Mattila, T.J. ja Rajala, J., 2017. Mistä ja miten tunnistaa maan hyvän kasvukunnon? Raportteja 171. Helsingin yliopisto, Ruralia-Instituutti. 40 s.
- Mattila, T.J., Manka, V., Rajala, J., 2018. Pikamenetelmät kasvin ravinnetilan kuvaajana. Helsingin yliopisto, Ruralia Instituutti, Raportteja 185.
- McDonald, N. T., Watson, C. J., Lalor, S. T., Laughlin, R. J. ja Wall, D. P. 2014. Evaluation of soil tests for predicting nitrogen mineralization in temperate grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 78: 1051-1064.
- Moore, A., Satterwhite, M., Lehrsch, G. ja McGeehan, S. 2016. Dairy manure applications and soil health implications. Idaho Nutrient Management Conference. Jerome, Idaho, 10.3.2016. *Proceedings of the Idaho Nutrient Management Conference* vol. 8. s. 11-15.
- Morrow, J. G., Huggins, D. R., Carpenter-Boggs, L. A. ja Reganold, J. P. 2016. Evaluating Measures to Assess Soil Health in Long-Term Agroecosystem Trials. *Soil Science Society of America Journal* 80: 450-462.
- Myrold, D. D. 1987. Relationship between microbial biomass nitrogen and a nitrogen availability index. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1047-1049.
- Myrold, D. D. ja Bottomley, P. P. 2008. Nitrogen mineralization and immobilization. Teoksessa Schepers J. S. ja Raun, W. R. (toim.): *Nitrogen in Agricultural Systems.* ASA, CSSA ja SSSA, Madison, WI. s. 157-172.



- Nyiraneza, J., N'Dayegamiye, A., Chantigny, M. H. ja Laverdière, M. R. 2009. Variations in corn yield and nitrogen uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices. *Soil Science Society of America Journal* 73: 317-327.
- Rajendra, P. ja Power, J.F. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Schomberg, H. H., Wietholter, S., Griffin, T. S., Reeves, D. W., Cabrera, M. L., Fisher, D. S., Endale, D. M., Novak, J. M., Balkcom, K. S. ja Raper, R. L. 2009. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1575-1586.
- Soon, Y. K., Haq, A. ja Arshad, M. A. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 2029-2043.
- Stanford, G., ja Smith, S. J.. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Journal* 36: 465-472.
- Sylvia, D.M., Fuhrmann J.J., Hartzel P.G., ja Zuberer D.A. 2005. Transformations of nitrogen. Teoksessa: Yarnell, D. (toim.). Principles and applications of soil microbiology. Toinen painos. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. s. 343-346.
- Tate, R. L. 1995. *Soil Microbiology*. Wiley, New York, USA.
- Valtioneuvosto 2015. Valtioneuvoston asetus ympäristökorvauksesta 235/2015. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150235>. Ladattu 20.9.2016.
- Van Eekeren, N., de Boer, H., Hanegraaf, M., Bokhorst, J., Nierop, D., Bloem, J., Schouten, T., de Goede, R., ja Brussaard, L. 2010. Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry* 42: 1491-1504.
- Van Gestel, M., Merckx, R. ja Vlassak, K. 1993. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: the fate of fast-and slow-growing microorganisms in soils from different climates. *Soil Biology and Biochemistry* 25: 109-123.
- Waring, S.A. ja Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under water-logged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* 201: 951-952.
- Weatherbase. 2016a. Austin, Texas. <http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=45227&cityname=Austin-Texas-United-States-of-America>. Ladattu 2.8.2016.
- Weatherbase. 2016b. Dublin, Ireland. <http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=96930&cityname=Dublin-Ireland>. Ladattu 2.8.2016.
- Wivstad, M., Dahlin, A. ja Grant, C. 2005. Perspectives on nutrient management in arable farming systems. *Soil Use and Management* 21: 113-121.
- Woodmansee, R. ja Duncan, D. 1980. Nitrogen and phosphorus dynamics and budgets in annual grasslands. *Ecology* 61: 893-904.
- Øien A., Selmer-Olsen, A.R., Bærug, R. ja Lyngstad, I. 1974. Studies on soil nitrogen. III. Effects of drying, deep-freezing and storage of moist soil on nitrogen mineralization. *Acta Agriculturae Scandinavica* 24 (3): 222-226.



