



RAPORTTEJA 191

MURUKESTÄVYYS MAAN KASVUKUNNON MITTARINA

JAANA RAVANDER, TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA



MURUKESTÄVYYS MAAN KASVUKUNNON MITTARINA

JAANA RAVANDER, TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA



Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

PRO
Agria



HELSINGIN YLIOPISTO
RURALIA-INSTITUUTTI

2019

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.

Julkaisija	Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti www.helsinki.fi/fi/ruralia-instituutti	
	Kampusranta 9 C 60320 SEINÄJOKI	Lönnrotinkatu 7 50100 MIKKELI
Sarja	Raportteja 191	
Kansikuva	Jaana Ravander	
ISBN	978-951-51-3771-5 (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 loholla sato jää huomattavasti pienemmäksi kuin muilla lohkoilla.

Maan murukestävyys kuvaa maamurujen kestävyttä liettymistä vastaan. Kestävät murut ovat yleensä samalla huokoisia ja biologisesti aktiivisia. Niiden avulla maan rakenne saadaan säilymään hyvänä rankoista sateista ja ajoittaisesta muokkauksesta huolimatta. Muruisessa pellossa biologinen aktiivisuus on korkeaa ja ravinnekierto toimii tehokkaasti. Hyvä murukestävyys on tuottavan pellon tunnusmerkki.

Murukestävyteen voi vaikuttaa erilaisilla viljelytoimilla. Kalkitus, kasvipeitteisyys, aktiivinen juuristo, hyvä kuivatus ja kevyt muokkaus edistävät murujen muodostumista. Samalla ne edistävät maan kasvukuntoa monipuolisesti, joten murukestävyttä voi käyttää mittaamaan kasvukuntoa laajemminkin. Muutokset murukestävydessä heijastavat muutoksia viljelykäytännöissä.

Tässä raportissa tarkastellaan maan murukestävyden taustaa tieteellisen kirjallisuuden avulla ja lisäksi kuvataan OSMO -koelohkoilla vuosien 2016-2018 välillä tehtyjä havaintoja murukestävydestä ja sen muutoksista.

Nyt julkaistava raportti *Murukestävyys maan kasvukunnon mittarina* on tuotettu osana *OSMO -Osaamista ja työkaluja resurssitehokkaaseen maan kasvukunnon hoitoon yhteistyöllä*-hanketta. Hankkeen tilatutkimusosiossa pyritään selvittämään monipuolisesti maan kasvukunnon tilaa kahdeksalla ongelmalohkolla Etelä-Pohjanmaalla, Satakunnassa ja Varsinais-Suomessa. Verranteina käytetään hyväkasvuisia lohkoja.

Tarkoituksena on myös kehittää tilatasolle soveltuvia maan kasvukunnon analysointi- ja havainnointimenetelmiä sekä selvittää millä toimenpiteillä ongelmalohkojen kasvukuntoa voidaan parantaa. Nyt julkaistavaan raporttiin on koottu kirjallisuuskatsauksen lisäksi keskeiset tulokset tutkittavien lohkojen murukestävydestä ja tulosten hyödyntämisestä maan kasvukunnon määrittämisessä. *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, Vesien suojelun 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 viljelytoimien suorittamisesta ja tutkimustulosten saamisesta. Raportin taitosta ja ulkoasusta kiitämme graafinen suunnittelija Jaana Huhtalaa.

Toivomme *Murukestävyys maan kasvukunnon mittarina* -raportin palvelevan suomalaisia viljelijöitä maan kasvukunnon parantamisessa.

Mikkelissä tammikuussa 2019

Tekijät

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	11
1.1 Mitä murut ovat?	11
1.2 Mitä edellytyksiä tarvitaan maan murustumiselle?	12
2 HAVAITOKUVIA MURUISTA	16
2.1 Savi- ja hiesumaat	17
2.2 Hietamaat ja eloperäiset maat	19
3 HYVÄN MURURAKENTEEN EDELLYTYKSET	21
3.1 Kemialliset tekijät: sopiva pH ja ionimäärät	21
3.2 Fysikaaliset tekijät: hyvä kuivatus ja kevyt muokkaus	21
3.3 Biologiset tekijät: runsaasti eliöitä	23
4 MURUKESTÄVYYS JA EKOSYSTEEMIN TOIMINTA	26
4.1 Ravinnekierto	26
4.2 Hiilen kierto	26
4.3 Vesitalous	27
5 MURUKESTÄVYYDEN MÄÄRITYS	28
5.1 Laboratorioanalyysit	28
5.2 Viljelijähavaintomenetelmät	29
5.3 Menetelmien vertailu OSMO koelohkoilla	30
5.3.1 Aineisto ja menetelmät	30
5.3.2 Lohkojen väliset erot	30
5.3.3 Muutokset vuosien välillä	33
5.3.4 Korrelaatio multavuuden ja peltohavaintojen kanssa	34
6 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	37
LIITE 1 Ohjeet Murukestävyuden määrittämiseen kuoppalevytestillä	39
LIITE 2 Ohjeet Murukestävyuden määrittämiseen teesihtitestillä	42

TIIVISTELMÄ

Murut ovat maan perusyksiköitä. Maan murukestävyys on keskeinen tekijä maan toimintakyvyn kannalta. Hyvä murukestävyys edistää mikrobitoimintaa, ylläpitää kaasunvaihtoa ja vesitaloutta sekä mahdollistaa kasvien hyvän kasvun. Murustuminen on siten tärkeä ominaisuus peltoekosysteemin toiminnan kannalta.

Murujen kestävyys vettymisen seurauksena tapahtuvaa liettymistä vastaan on tärkeä maan kasvukunnon mittari. Jos murut ovat kestäviä, maan rakenne pysyy vakaana ja huokoisena. Murukestävyyttä mitataan liettämällä muruja kokeellisesti ja tarkastelemalla, kuinka suuri osuus niistä säilyy ehjänä.

Koska murukestävyys riippuu samoista tekijöistä kuin koko maan kasvukunto (mm. happamuus, ionisuhteet, maan rakenne, juuriston aktiivisuus, eloperäisen aineen lisäys, mikrobiaktiivisuus ja vesitalous), murukestävyys on hyvä seurantaindikaattori maan kasvukunnon muutoksille.

Maan murukestävyyttä voi kehittää ja ylläpitää viljelytekniikan avulla. Viljelytekniikassa on huomioitava maan kemiallinen tila (kalkitus, ravinnesuhteet), fysikaalinen tila (kuivatus, muokkaus) ja biologinen tila (juuristo, maaperäeliöt, lisätty elope-

räinen aines). Maan murukestävyuden hoitomenetelmät ovat kytköksissä koko viljelyjärjestelmään. Siksi maan kasvukunnon kehittymistä voidaan seurata murukestävyuden määrittäisin.

Tässä raportissa käydään läpi tieteellistä kirjallisuutta murukestävyteen vaikuttavista tekijöistä, murukestävyuden vaikutuksista maan kasvukuntoon sekä murukestävyuden mittausmenetelmistä. Sen lisäksi raportissa esitetään 3 vuoden koesarjan tuloksia (2016-2018) OSMO-hankkeen 24 koelohkolta. Lohkot edustivat erilaisia lohkoja eri puolilta Suomea. Tulosten avulla tarkastellaan kuinka hyvin eri määrittämenetelmät vastaavat toisiaan ja miten tulokset kuvaavat maan kasvukunnon eri osa-alueita.

Murukestävyuden luotettava arviointi käytännön viljelmillä on tulosten perusteella edelleen haastavaa ja kaipaisi menetelmäkehitystä. Viljelijä- ja neuvojakäyttöön Besten menetelmä, jossa arvioidaan 20-40 murun kestävyyttä vaikuttaisi käyttökelpoiselta keinolta lohkojen välisen eron ja lohkojen ajallisen kehityksen seurantaan.

Asiasanat: maaperätutkimus, eroosio, murukestävyys, maan laatu

ABSTRACT

AGGREGATE STABILITY AS AN INDICATOR OF SOIL HEALTH

Aggregates or crumbs are the basic building blocks of soil structure. Their stability against dispersion from water is a key indicator for healthy soil. If the crumbs are stable, the soil structure is stable and porosity can be maintained. Soil aggregate stability is measured by submerging aggregates to water and observing the fraction of particles that maintain their stability.

In addition as aggregate stability depends on the same factors as overall soil health, it can be used as a monitoring indicator. It will provide a measurement of the total effect of liming, fertilization, tillage, crop roots, addition of organic matter, micro-

bial effect and soil water balance on the soil system. Changes in aggregate stability can then be used to monitor the effect of changes in farming practices.

This report looks at soil aggregate stability through a literature review and through experimental measurements. The review focuses on the factors that contribute to aggregate stability and the effect of aggregate stability to soil functioning. In addition monitoring results from 24 test fields over three years are used to compare different ways of measuring aggregate stability and to link aggregate stability with other components of soil health.

1 JOHDANTO

1.1 MITÄ MURUT OVAT?

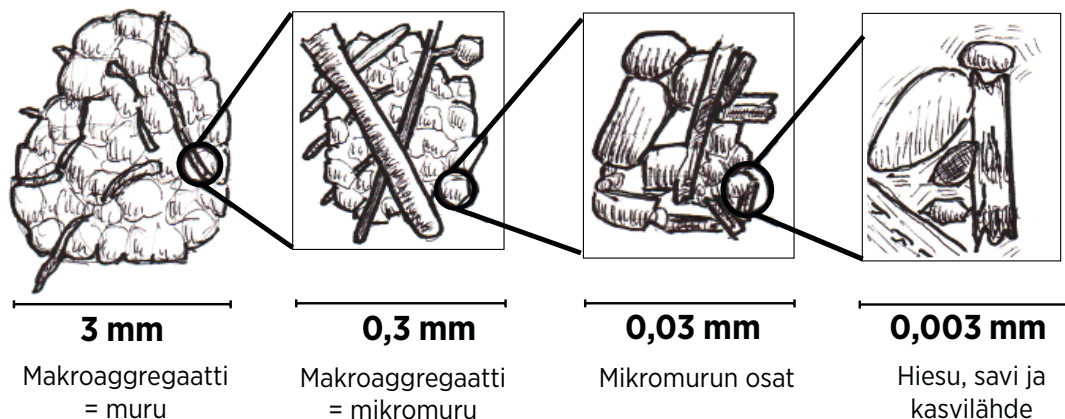
Murut ovat maan perusyksiköitä (Kuva 1). Niillä tarkoitetaan 2-8 mm huokoisia kappaleita maata. Sitä suuremmat kappaleet ovat kokkareita, paakkuja tai lohkkareita ja sitä pienemmät pienmuruja ja maahiukkasia. Muruihin ei kuitenkaan lueta karkean hiedan ja soran maalajitteita, vaan murut koostuvat pienemmistä yksiköistä ja ovat yleensä huokoisia.

Erikokoiset ja muotoiset murut muodostavat maahan tukevan rakenteen, jossa murujen sisällä ja väleissä olevat tilat määräävät veden ja ilman kulkeutumisen edellytykset (Amézketa 1999). Suuria huokosia pitkin sadevesi pääsee nopeasti maan pinnalta syvempiin maan kerroksiin, jolloin maan pinnalle ei synny pintavaluntaa. Kun suurin osa vedestä on valunut painovoiman vetämänä pois suurista huokosista, ne täyttyvät ilmalla. Sekä kasvien juuret että maaperän pieneliöstö saavat näin happea, ja toisaalta reitin poistaa syntyvää hiilidioksidia ja muita hengityksessä syntyviä haihtuvia aineenvaihduntatuotteita. Maan pienet huokokset eivät tyhjene vedestä valumalla. Nämä vesivarannot pitävät maan kosteana, eikä pelto pääse kuivumaan liikaa.

Huokosten koko ja erikokoisten huokosten jakauma vaikuttavat siten suuresti maan toimintaan (Beste 2006). Suurten murujen väliin jää paljon

suuria huokosia, kun taas pienet murut mahtuvat asettumaan tiiviimmin lähekkäin, mikä lisää pienten huokosten määrää. Hyvin murustuneessa maassa jakauma on tasapainossa, ja sekä kaasuetä vesitalous ovat vakaat.

Murustuminen lisää maan käyttökelpoista pinta-alaa merkittävästi. Tämä on tärkeää, sillä suuri osa maaperän prosesseista tapahtuu erilaisilla rajapinnoilla maapartikkelien ja niitä ympäröivien vesikalvojen ja ilmahuokosten välillä. Asian mittaavaa voi hahmottaa teoreettisella laskelmalla, jossa maaprofiilin ajatellaan koostuvan erikokoisista kuutioista. Jos neliömetrin laajuinen ja 20 cm syvyinen maaprofiili (ruokamultakerros) on täysin rakenteeton ja tiivis, sen pinta-ala on neliometri. Jos maaprofiili halkeilee 10 cm kuutioiksi, kuutioita mahtuu samalle alueelle 200 kpl ja jokaisen pinta-ala on 0,1 m x 0,1 m x 6 sivua = 0,06 m². Tällöin yhdistetty pinta-ala on jo 12 m². Kun murustuminen etenee pienempiin osiin, pinta-ala kasvaa nopeasti. Kuvan 1 mukaisia 3 mm muruja mahtuu kuvitteelliselle neliön ruokamultakerrokselle noin 7,5 miljoonaa ja niiden yhteenlaskettu pinta-ala on 400 m²! Todellisuudessa maamurut eivät ole tiiviitä kuutioita, vaan niiden pinta on epätasainen ja niiden sisällä on huokosia. Jos tarkastellaan tilannetta vielä yksinkertaisesti ja oletetaan, että jokaisessa pienessä maakuutiossa on 5 x 5 reikää, joiden halkaisija on



Kuva 1. Maamurut koostuvat pienmuruista, jotka koostuvat edelleen pienemmistä osista, jotka ovat muodostuneet toisiinsa liimaantuneista savi, hiesu ja kasvintähdehiukkasista. (Piiirretty Weil ja Brady 2016 perusteella.)

1/10 murun leveydestä (0,3 mm), maaperäneliön pinta-ala kasvaa 924 neliometriin. 10 cm paakkuihin verrattuna hyvärakenteisessa maassa on siis vähintään 75 kertainen pinta-ala.

Murut voidaan jakaa karkeasti kahtia: huokoiisiin, biologisesti syntyneisiin muruihin ja fysikaalisesti syntyneisiin, ei-huokoiisiin muruihin (Beste 2006) (Kuva 2). Biologisesti syntyneissä muruissa on kiviaineksen lisäksi paljon eloperäistä ainesta, kuten juuria ja kasvijätteitä sekä maaperän pieneliöstöä (sienirihmasto ja bakteerit) (Kuva 1). Biologiset murut ovat pyöreähköjä ja kestäviä, ja niiden sisällä on mikroskooppisia huokostiloja. Kasvien hiusjuuret kasvavat helposti näiden murujen sisään hakemaan ravinteita. Kun hiusjuuri kuolee, sen sisältämät ravinteet sitoutuvat maahan huokosen reunoille. Pyöreiden huokoisten murujen väliin jää paljon huokostilaa, jota kautta vesi ja kaasut pääsevät kulkemaan.

Fysikaalisesti syntyneet ei-huokoiset murut ovat enemmän sepelimäisiä, sileäpintaisia muruja. Ne syntyvät, kun routa tai maan kuivuminen saa maan halkeilemaan. Myös voimakkaalla muokkauksella saadaan isoja paakkuja ja kokkareita hajoamaan pienemmiksi kokkareiksi ja sepelimäisiksi muruiksi. Murujen pinnat ovat sileitä ja ehyitä, joten kasvien juuret eivät saa kasvettua niiden sisään. Pieneliöstön toiminta ei ulotu murujen sisään, sillä muruun ei johda vettä ja kaasun vaihtoa mahdollistavia huokosia. Murun sisäosat ovat näin suojassa hajottajilta. Hajottajien tehtävä on irrottaa murun sisältämästä kiviaineksesta ja orgaanisesta aineksesta ravinteita kasvien käyttöön. Fysikaalisesti syntyneet murut eivät tarjoa maan toiminnalle samanlaisia mahdol-

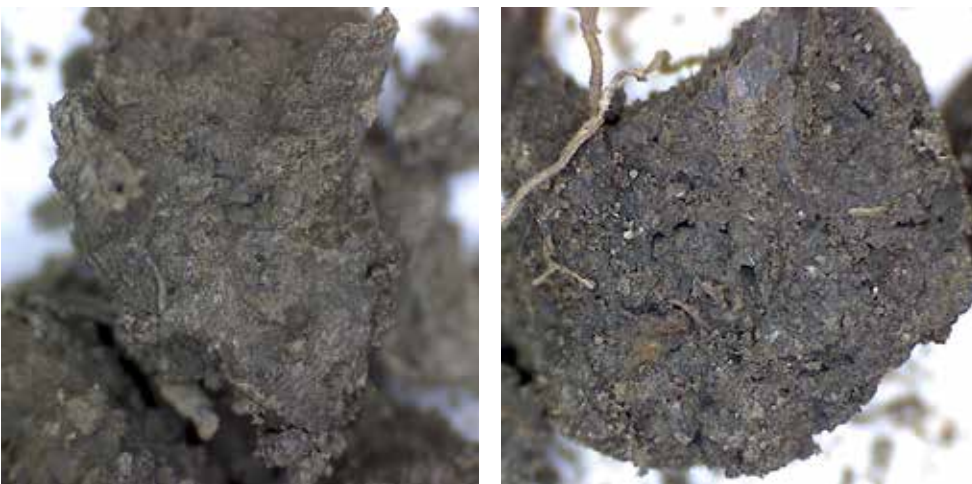
lisuuksia kuin biologisesti syntyneet murut. Tiiviisti asettuneena sepelimäiset murut voivat estää juurien kasvun muualla kuin murujen välissä, jolloin kasvin kasvu on heikkoa kun se ei saa sileiltä pinnoilta tarvitsemiaan ravinteita.

1.2 MITÄ EDELLYTYKSIÄ TARVITAAN MAAN MURUSTUMISELLE?

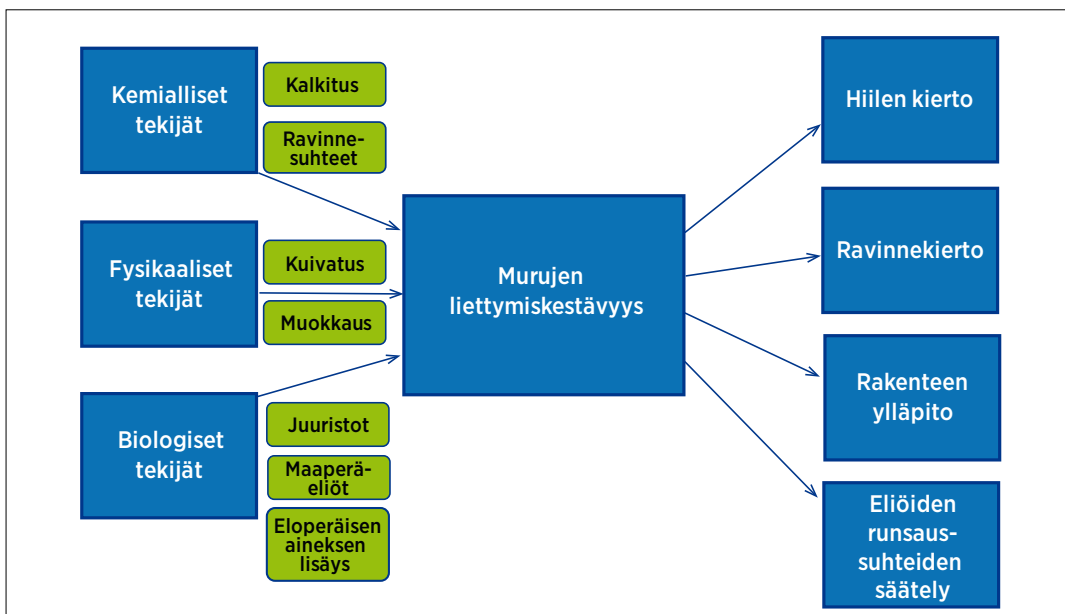
Maan murustumiseen vaikuttaa viisi eri tekijää: maaperäeläimet (mm. lierot), mikrobit (bakteerit ja sienet), juuret, epäorgaaniset sidosaineet (mm. kalsium), sekä olosuhteet (mm. kuivuminen, routa) (Six ym. 2004). Näitä tekijöitä voidaan ohjalla viljelytoimin, mm. viljelykasvien valinnalla ja maan muokkauksella.

Kiinteä, tiivis maaprofiili murustuu ensin fysikaalisesti. Maan kuivuessa se kutistuu ja maahan muodostuu jännitystiloja. Jännitys purkautuu maan halkeiluun. Kun kuivuminen etenee, halkeilu jatkuu kohtisuoraan edellisiin halkeamiin nähden (Horton ym. 2016.). Kostumisen ja kuivumisen vuorottelu pilkkoo maakokkareita pieniksi, terävä-särmäisiksi muruiksi. Parhaiten tätä ilmiötä voi havainnoida kevättalvella, kun sulaminen ja jäätymisen vuorottelevat maan pintakerroksissa ja rouste hienontaa maan pintaa.

Maan murujen liettymiskestävyttä tarkastellaan tässä raportissa kahdesta näkökulmasta: murujen muodostumisen edellytyksistä lähtien sekä murujen vaikutusta peltoekosysteemin toimintaan tarkastellen (Kuva 3).



Kuva 2. Terävä-särmäinen ja tiivis fysikaalinen muru (vasen) sekä pyöreäsärmäinen biologinen muru (oikea). Kuvat: Veera Manka



Kuva 3. Murujen liettymiskestävyys riippuu maan kemiallisista, fysikaalisista ja biologisista tekijöistä. Murukestävyys säätelee hiilen ja ravinteiden kiertoa sekä eliöiden runsaussuhteita ja pitää yllä maan rakennetta.

Biologisten murujen synty on monivaiheinen prosessi. Kasvintähteiden ja lisätyn eloperäisen aineen hajoaminen edistää murustumista. Aluksi hajoava eloperäinen aines peittyy hajottajabakteereihin ja sienirihmoihin, joiden eritteisiin tarttuu saveshiukasia. Tämä saveksen peittämä muru kasvaa kokoa, kun hajottajien eritteet liimaavat uusia hiukkasia murun ulkopinnoille. Orgaanisen aineksen hajotessa muruun syntyy pieniä huokosia. Niiden kautta murun sisäosiin muodostuu hajotusta ylläpitäviä kaasujen ja veden kulkureittejä. Kun suurten murujen sisältämät orgaaniset materiaalit kuluvat loppuun, muru hajoaa. Tällöin hajotuksessa mineralisoidut

ravinteet vapautuvat kasvien käyttöön. Hajonneen murun rippeet toimivat maassa pienmuruina ja tuovat pieniä huokostiloja maahan, kunnes aktiivisen pieneliöstön tuottamat lima-aineet sitovat ne uusiksi muruiksi. Tämä jatkuva kierto ylläpitää maan muruisuutta (Beste 2006).

Viljelijä voi edistää tai heikentää maan murustumista (Kuva 4). Jos maa saadaan pidettyä ilmavana ja sopivan kosteana, maaperäeliöiden toiminnalle on hyvät edellytykset. Jos viljelyjärjestelmässä lisätään jatkuvasti kasvintähteitä ja muuta eloperäistä ainetta, hajotustoiminta on aktiivista ja uusia muruja liimaantuu lisää. Lisäksi juuret kuivattavat



Kuva 4. Hyvärakenteinen hietasavimaa (hehikutushäviö noin 12 %) sisältää runsaasti huokoisia 2-7 mm muruja. Sitä on helppo muokata ja sen kasvukunto on hyvä. Yhdellä äestyksellä saadaan hyvä kylvöalusta. Kuva Jukka Rajala.

maata lisäillen sen halkeilua ja juurieritteet ruokivat pieneliöstöä, joka vakiinnuttaa mururakennetta. Juuret jättävät huokosia, jotka vievät vettä ja happea syvempiin maakerroksiin, mikä lisää syvempien kerrosten mikrobiaktiivisuutta ja mururakenteen kehittymistä.

Liian voimakas maan muokkaus voi johtaa maan rakenteen hajoamiseen (Kuva 5). Tällöin toiminnaltaan tärkeät suuret murut hajoavat pienemmiksi paljastaen sisälleen varastoituneet hiiliyhdisteet (Six & Paustian 2014). Runsas kuohkeutus tekee maasta niin ilmavaa, että hajottajamikrobien toiminta nopeutuu liikaa. Tällöin mikrobit hajottavat orgaanista ainesta nopeammin kuin maahan tulee uutta, jolloin eloperäinen aines maassa vähenee. Avokesannolla pellon pintaosien murujen orgaaninen aines kulutetaan nopeasti loppuun (Algayer ym. 2014). Näin ollen riski pinnan liettymiseen ja kuorettumiseen kasvaa. Myös tuulieroosion riski kasvaa maan pinnan ollessa paljaana (Amézketa 1999).

Kasvipeitteisyys suojaa maan pintaa. Kasvusto ja sen tuottama kasvijäte toimii suojana sekä paah-teelta että kovilta sateilta, ja luo alleen melko tasaiset olosuhteet (Blanco-Canqui & Lal, 2009). Maan pinnan kosteus ei vaihtele kasvipeitteen alla yhtä jyrkästi kuin paljaana ollessaan, etenkin jos pintaan kertyy kariketta. Tasainen kosteus vuorostaan edistää pintamaan eliötoimintaa. Hajottajat ovat aktiivisia, ja tuottavat samalla maan rakennetta suo-jaavia lima-aineita. Kasvit ja kasvijäte vaimentavat pisaroiden iskuja ennen kuin ne osuvat maahan. Sade ei saa lietettyä maata, kun pintamaa on sekä kasvista että kasvintähteistä muodostuvan suojan alla ja lima-aineet ovat vahvistaneet muruja vettä kestäviksi. Kasvipeitteisyyden pysyvyys on siis tär-

keä tekijä pintamaan liettymisen ja kuorettumisen ehkäisemisessä. Jatkuva kasvipeite tarjoaa myös pinnan alla katkeamattoman ravinnonsaannin hajottajille, ja ehkäisee ravinnehuutoumia käyttäen vapautuvia ravinteita koko kasvuaikansa. Etenkin pintamaan eloperäisen aineksen määrä kasvaa, mikä mahdollistaa suuremman maamikrobiston määrän lisäten niiden toimintaa ja kiihdyttäen ravinkeiertoa. Jatkuva kasvipeitteisyys lisää suurten murujen määrää suhteessa pieniin muruihin, mikä edistää maan toiminnallisuutta (Vezzani ym. 2018).

Ihannetapauksessa viljelytekniikalla pidetään maaperässä koko ajan aktiivisia juuria, maaprofiili on ilmava ja sopivan kostea (lähes kenttäka-pasiteetissa) sekä siinä on jatkuvasti hajotettavaa eloperäistä ainetta. Erityyppiset kateviljelymenetelmät (matala, ei-sekoittava muokkaus) toimivat murustumisen kannalta hyvin, jos rakenne on hyvä ja ylimääräinen vesi pääsee poistumaan ja toisaalta katekerros ei ole niin paksu, että se haittaisi kaasunvaihtoa. Toisaalta, jos maa ei ole lähtötilanteessa muruinen (esim. lohkarainen kynnös), sen kuivuminen nopeuttaa halkeilua ja käynnistää murustumisen.

Jos maa on tiivistynyt, tarvitaan usein mekaanista kuohkeutusta murustumisen käynnistämiseen. Brittiläinen Sustainable Soils Initiative (SMI, 2002) kiteytti savimaiden murustavan muokkauksen seuraavasti:

- ensimmäisessä muokkauksessa poistetaan mahdolliset tiivistymät
- muokkausta syvennetään vähitellen pinnasta alkaen, maata murustaen
- syntyneet suuremmat paakut rikotaan jyrällä välittömästi, pinta tiivistetään kosteuden haihtumisen rajoittamiseksi



Kuva 5.

Liettynyttä ja kuorettunutta hiesusa-vipeltoa. Syynä pitkään jatkunut kevätviljojen viljely, eloperäisen aineen puute sekä vuosittainen voimakas muokkaus. Kuva: Jukka Rajala.

Eloperäisen aineen lisääminen parantaa murustumista ja sopiva kosteus parantaa savimaan ”kypsymistä” hyvärakenteiseksi (Kuva 4, Kuva 6). Muokausketjujen suunnittelu on liian monimutkainen aihe tässä raportissa käsiteltäväksi. Lisää tietoa

maan muokkauksen vaikutuksista eri maalajien murustumiseen löytyy esimerkiksi oppikirjasta: ”Book of soil tillage” (Birkás, 2014), sekä OSMO hankkeen tietokorteista.



Kuva 6. Tiivistyneen savimaan murustumiseen voidaan tarvita myös sopivaa mekaanista kuohkeutusta. Kun muokkaus on tehty matalaan lautasmuokkarilla, maa ei ole murustunut aivan pintakerrosta lukuunottamatta, kuva vasemmalla. Syvempään kultivaattorilla ja jankkurilla kuohkeutetulla loholla maa on murustunut hyvin myös syvemmälle, kuva oikealla. Kuvat: Jukka Rajala.

2 HAVAINTOKUVIA MURUISTA

OSMO- hankkeen koelohkoilta (n=24) kerättiin kesällä 2018 maanäytteitä maan pintakerroksista. Maanäytteet seulottiin ja niistä valikoituja muruja tarkasteltiin digitaalisella mikroskoopilla (Veho

VMS 200x, Verkkokauppa.com). Seuraavat kuvat (Kuva 7, Kuva 8, Kuva 9, Kuva 10) valikoitiin siten, että ne kuvaavat hyvin jokaista OSMO-hankkeen 24 lohkoa.

2.1 SAVI- JA HIESUMAAT



He 0 (savi): 6 mm muru, 7 % multavuus,
36 % murukestävyys



He 1 (savi): 10 mm muru, 6 % multavuus,
36 % murukestävyys



He K (savi): 8 mm muru, 6 % multavuus,
52 % murukestävyys



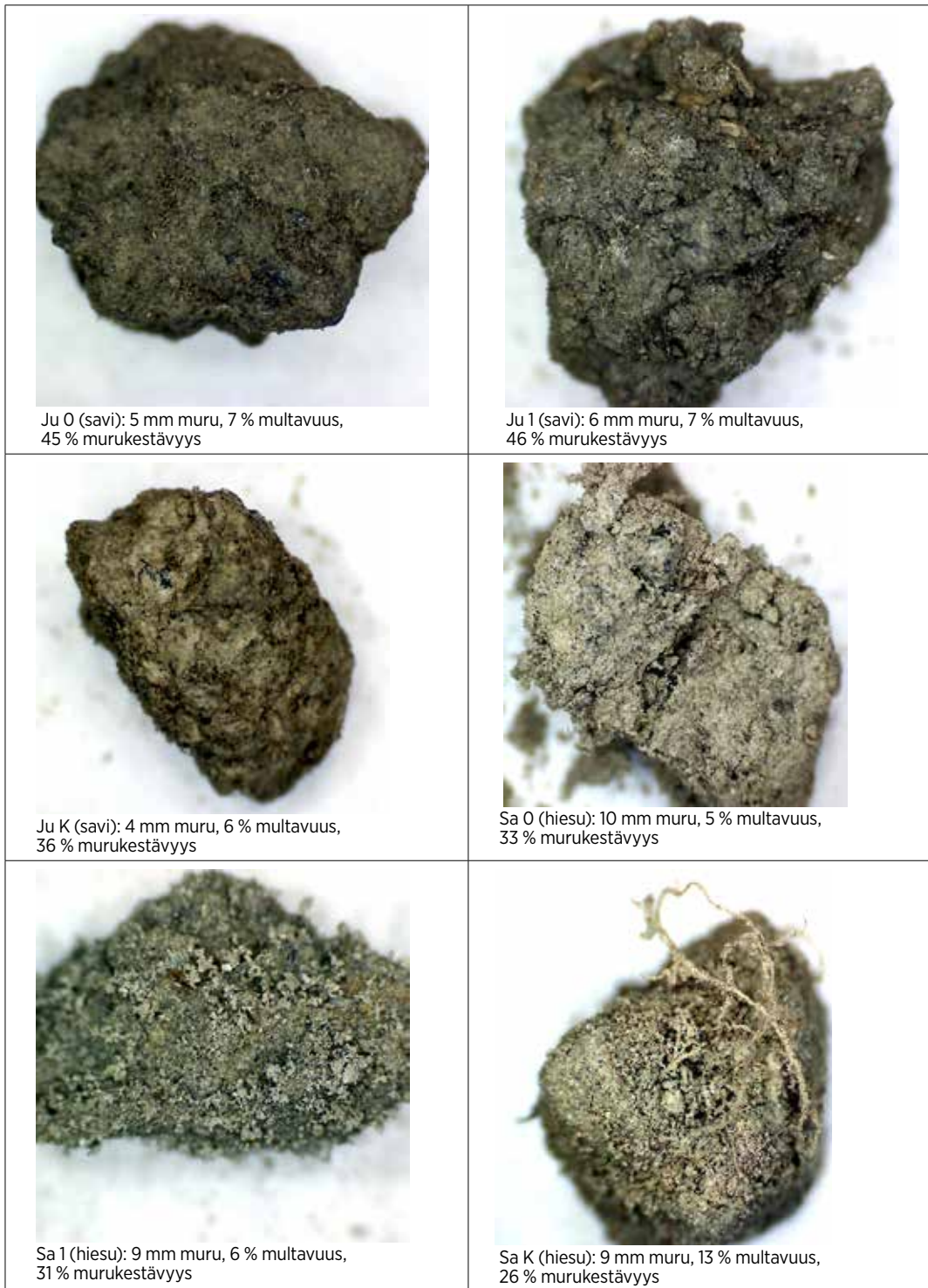
Hy 0 (savi): 4 mm muru, 9 % multavuus,
28 % murukestävyys



Hy 1 (savi): 5 mm muru, 9 % multavuus,
31 % murukestävyys



Hy K (savi): 5 mm muru, 5 % multavuus,
38 % murukestävyys



Kuva 8. Hiesumailla murut muodostuvat enenevässä määrin toisiinsa liimautuneista hiekanjyvistä ja juurista.
Kuvat: Veera Manka

2.2 HIETAMAAT JA ELOPERÄISET MAAT



Ha 0: 10 mm muru, 32 % multavuus,
36 % murukestävyys



Ha 1: 5 mm muru, 35 % multavuus,
37 % murukestävyys



Kä 1: 11 mm muru, 40 % multavuus,
16 % murukestävyys



Kä 0: 7 mm muru, 36 % multavuus,
23 % murukestävyys



Ha K: 10 mm muru, 6 % multavuus,
32 % murukestävyys



Kä K: 7 mm muru, 6 % multavuus,
37 % murukestävyys

Kuva 9. Eloperäisillä mailla muruissa on vähän kivennäisainetta. Kuvat: Veera Manka

20 MURUKESTÄVYYS MAAN KASVUKUNNON MITTARINA
JAANA RAVANDER, TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA



Lu 0: 4 mm muru, 3 % multavuus,
8 % murukestävyys



Lu 1: 6 mm muru, 3 % multavuus,
26 % murukestävyys



Lu K: 5 mm muru, 4 % multavuus,
33 % murukestävyys



Pa 0: 9 mm muru, 6 % multavuus,
28 % murukestävyys



Pa 1: 11 mm muru, 5 % multavuus,
31 % murukestävyys



Pa K: 6 mm muru, 5 % multavuus,
36 % murukestävyys

Kuva 10. Hietamailla murujen ulkopinnassa on melko vähän huokosia. Hieta- ja hiekkajyvät ovat selvästi näkyvillä. Murut koostuvat eloperäisen aineen toisiinsa liimaamista hietahiukkasista. Kuvat: Veera Manka

3 HYVÄN MURURAKENTEEN EDELITYKSET

3.1 KEMIALLISET TEKIJÄT: SOPIVA PH JA IONIMÄÄRÄT

Murujen kestävyteen vaikuttavat erilaiset epäorgaaniset sidosaineet. Savesaineet sitovat maata, mutta myös rauta, alumiini, kalsium ja magnesium tekevät maassa kemiallisia sidoksia. Etenkin moniarvoiset varautuneet hiukkaset (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), oksidit sekä Ca- ja Mg-karbonaatit sitovat maata yhteen sähköisellä vuorovaikutuksella (Amézketa 1999). Happamissa maissa sitoutunut orgaaninen aines on tiukasti kiinnittyneenä raudan oksideihin sekä alumiinisilikaateihin (Kögel-Knabner ym. 2008).

Natrium-, kalsium- ja magnesiumpitoisuus sekä pH ovat yhteydessä maan fysikaaliseen kestävyteen. Muruihin sitoutunut natrium yhdessä veden kanssa aiheuttaa saveksen turpoamista, jolloin heikkorakenteiset murut liettyvät. Kemiaallisiin sidosvoimiin vaikuttaa myös maassa olevan kalsiumin ja magnesiumin suhde toisiinsa. Kalsium on magnesiumia voimakkaampi sitomaan savespartikkeleita yhteen (Amézketa 1999; Dontsova ja Norton 2002; Horton ym. 2016). Viljelytekniisesti murukestävyttä voidaan lisätä kemiallisesti huolehtimalla kalkituksen avulla sopivasta pH:sta ja Ca:Mg suhteesta. Savimailla voi olla tarpeen lisätä kalkitusta tasolle, jossa maassa on vapaata kalkkia (Schmidt, 2016). Kalkitus voi joillain mailla johtaa huomattavaan fysikaaliseen muutokseen, vaikka haettu vaikutus on kemiallisissa ominaisuuksissa. Maan puristuksen kesto sekä veden- ja kaasunläpäisevyys voivat muuttua riippuen kalkitusta edeltäneestä maan rakenteesta. Kalkitus saa maassa aikaan aineiden saostumista ja sementtituotteiden muodostumista. Nämä sementtiset aineet lisäävät maan puristuskestävyyttä pinnoittamalla murut kovalla kalvolla. Pinnoite myös liimaa muruja yhteen. Hienojakoisilla mailla sementtiset ominaisuudet voivat samalla aiheuttaa kaasuja ja vettä kuljettavien huokosten tukkeutumista (Wang Y. ym. 2017). Tämä voi johtaa heikentyneeseen mikrobiston toimintaan, mikä heikentää murustumista ja murujen kestävyttä. Alkujaan suurimuruisessa maassa vaikutus on lievempi, sillä murujen väliin

jää suurempia huokosia jotka eivät yhtä helposti tukkeudu.

Kalkituksen lisäksi murustumista voidaan lisätä erilaisilla pintajännityksen alentajilla. Jos maahiukkasten välillä oleva vesikalvo ohenee, se mahdollistaa niiden tarttumisen toisiinsa. Erilaisen ”maankunnostus” (*soil conditioner*) aineiden käyttöä on tutkittu etenkin hietamailla (Ritchey ym. 2012). Pintajännityksen alentajina on käytetty natriumlaureettisulfaattia (Ritchey ym. 2012) ja jukkapalmun uutetta (Liu ym. 2017). Myös kipsin vaikutus perustuu Ca:Mg suhteiden säädön lisäksi siihen, että se lisää maaveden suolapitoisuutta ja mahdollistaa saveshiukkasten tarttumisen toisiinsa suuremmiksi muruiksi (Uusitalo ym. 2012).

Kestäviä muruja muodostuu helpommin maihin, joissa on savea (Beste, 2002). Tämän johdosta saven lisäämistä hietamaihin on tutkittu ennen kaikkea eroosion estämiseksi (Diouf ym. 1990). Saven lisääminen ja sekoittaminen on kuitenkin peltoimittakaavassa haasteellista.

3.2 FYSIKAALISET TEKIJÄT: HYVÄ KUIVATUS JA KEVYT MUOKKAUS

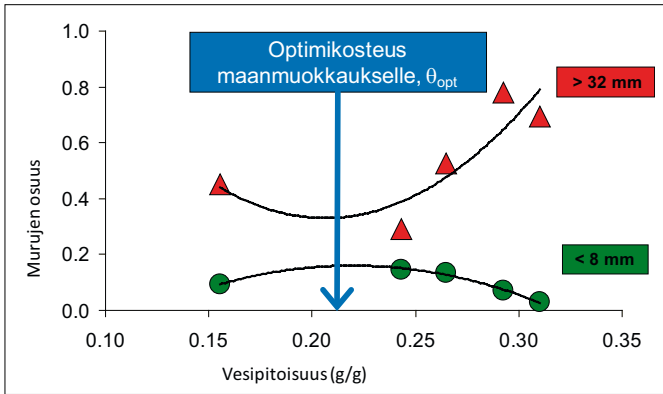
Maan vetyminen ja kuivuminen vaikuttavat maan rakenteeseen (Rahman ym. 2018). Nopea vetyminen heikentää maan rakennetta sekä epätasaisen turpoamisen kautta että nostamalla kapillaaritoihin jääneen ilman painetta (Amézketa 1999). Märkyys heikentää myös yksittäisten murujen kestävyttä. Vedellä kyllästyneet murut ovat alttiimpia liettymään seuraavan sateen myötä kuin jos maa ehtisi kuivua välillä. Etenkin runsaasti muokatuilla ja vähän orgaanista ainesta sisältävillä mailla murukestävyys heikkenee pitkällisen vetyymisen myötä (Soinne ym. 2016). Mitä runsaampi savespitoisuus maassa on, sitä enemmän märkyys heikentää maan rakennetta. Vesi liuottaa murujen sisältä sementtisiä aineita ja savesta haurastuttaen muruja (Panabokke & Quirk, 1957). Alhainen Ca:Mg suhde heikentää murukestävyttä entisestään (Dontsova ja Norton, 2002). Kuivuvassa maassa veden poistuminen saa hienojakoiset ainekset taas vastakkain

lisäten koheesiota. Edelleen kuivuva maa saa turvonneet ainekset kutistumaan, ja maa murustuu fyysikaalisesti (Amézketa 1999).

Maassa oleva vesimäärä vaikuttaa maanmuokkauksen edellytyksiin. Liian kuiva maa ei murustu kunnolla, kun tiukasti toisiaan vasten painuneet maahiukkaset vastustavat työkoneen etenemistä. Toisaalta vesimäärän ollessa liian suuri maa hiertyy ja painuu kasaan murustumatta. Maanmuokkaukselle sopiva kosteusalue määrittyy pellon mukaan: alaraja eli liiallinen kuivuus riippuu maanmuokkaukseen käytetystä energiamäärästä (vetovoiman tarve), yläraja eli liiallinen märkyys on maaperän ominaisuus. Yläraja kosteudessa tulee vastaan, kun maa saavuttaa plastisen muovautuvuusrajansa (PL, *plastic limit*). Rungas multavuus suurentaa näiden kosteusrajojen välissä olevaa muokautuvuusalueta (Kuva 11). (Keller 2016)

Vedellä on merkitystä mururakenteeseen myös lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle. Maan jäätyminen ja sulaminen vaikuttavat murujen kestävyteen (Kværno & Oygarden, 2006). Routa rikkoo maan rakennetta. Etenkin lumettoman maan ongelmana voi olla toistuva jäätyminen ja sulaminen, jos maassa on paljon vettä mutta ei lunta suojaamassa pakkasilta. Maassa oleva vesi jäätyy, ja jääkiteiden kasvu rikkoo murujen sisäisiä ja välisiä sidoksia. Maan sulaessa rakenne muuttuu jälleen, kun jään tuottamat huokostilat romahtavat. Rungasavisilla raskailla mailla roudan vaikutus on murustava (Kuva 12), kun taas löyhillä mailla jääkiteet voivat hajottaa heikot maata yhdessä pitävät voimat. (Amézketa 1999)

Maanmuokkaus vaikuttaa eri tavoin eri murukokoihin. Suuret murut hajoavat maata muokattaessa helpommin kuin pienet murut. On kuitenkin



Kuva 11. Optimikosteus maan muokkaukselle (Keller, 2016).



Kuva 12. Tilapäisesti tiivistynyt hietasavimaa on syksyllä lohkareinen. Kevääseen mennessä lohkareet ovat murustuneet roudan vaikutuksesta. Kuvat: Jukka Rajala.

tärkeä huomata, että hajoaminen voi tapahtua kahdella tavalla: lohkoutuminen suurmurujen sisältämiksi pienmuruiksi (luontaista murujen uudistumista edistävää) tai rakenteen hajoaminen kokonaan (Amézketa 1999). Jälkimmäisestä voi seurata mm. ei-toivottua saveksen ja ravinteiden valumia. Toisaalta halkaisijaltaan yli 6 cm:n paakkujen muodostuminen vähentää tiiviillä savimailla maahengitystä, mikäli paakkujen sisään ei johda halkeamia tai huokosia (Kainiemi ym. 2015).

3.3 BIOLOGISET TEKIJÄT: RUNSASTI ELIÖITÄ

Maaperän murustuminen ja biologisesti syntyneiden murujen kestävyys ovat maaperän eliöiden aktiivisen toiminnan tulos. Bakteerit, sienet ja maaperäeläimet muokkaavat maata. Myös niiden elämän päätyttyä ne ovat osa maan toimintaa ylläpitävää orgaanista materiaalia.

Kastelieroit ja muut maassa elävät lierit syövät kasviainesta (Kuva 13). Ne hakevat kasvinosia ja kariketta maan pinnalta, ja vetävät ne käytäviinsä syötäväksi. Lierojen ruoansulatuksessa orgaaninen aines ja mineraalit sekoittuvat ruoansulatuskanavan eritteiden kanssa, ja muodostuva uloste tuo maahan hienojakoisia pienmuruja (Six & Paustian 2014). Ulosteen pienmurut ovat kestäviä. Ne sisältävät ravinteita, mutta myös paljon murua koossa pitäviä sidosaineita. Lierojen tapa liikkua maan eri kerroksissa kuljettaa tehokkaasti ravinteita, mikro-

beja ja orgaanista ainetta paikasta toiseen. Karikkeen ravinteet voivat lierojen kautta kulkeutua yli metrin syvyyteen. Ravinteiden saanti tukee syvien maakerrosten mikrobiston aktiivisuutta, mikä edistää näiden kerrosten murustumista. Lierojen tekemien syvien käytävien myötä maahan pääsee ilmaa, ja hiilidioksidi pääsee poistumaan. Näin pohjamaan mikrobisto pysyy hyvinvoivana, ja ylläpitää vettä läpäisevää ja kasvin juurten kasvua tukevaa maan rakennetta.

Myös sienet ovat hajottajaeliöitä. Niiden rihmastot koostuvat ohuiden säikeiden verkoista, jotka tunkeutuvat tehokkaasti laajalle maan sisään. Rihmastot sitovat maata yhteen. Sieni kasvaa maahiukkasiin ja esimerkiksi lierojen ulosteisiin saadakseen niihin sitoutuneita ravinteita. Osalla sienistä on mahdollisuus myös toimia yhteistyössä kasvien kanssa, joko sienijuurina (mykorritsa) tai juuristovyöhykkeessä (ritsosfääri). Kummassakin tapauksessa kasvi saa sieneltä ravinteita, joihin kasvi ei omalla juuristollaan pääsisi käsiksi. Kasvi taas luovuttaa sienelle sokereitaan, joiden avulla sieni kasvattaa rihmastoaan yhä laajemmalle. Suurempi rihmasto sitoo maata yhteen entistä paremmin, ja maan murukestävyys paranee. Sienitautien torjunta-aineiden käyttö haittaa sienitautien lisäksi myös maaperän hyödyllisiä sieniä. Niiden käyttö heikentää murukestävyyttä, kun sienirihmastojen sitova vaikutus heikkenee (Tang ym. 2011).

Maassa olevien murujen kokojakauma ja huokoisuus määrittävät mikrobiston ja pieneliöstön olosuhteet. Bakteerit (0,5-2 µm, mikrometriä, millin tuhannesosa) ovat suojassa pienimpien mikro-



Kuva 13.
Lierot ovat tärkeitä maan murustajia ja muokkaajia.
Kuva: Jukka Rajala.

murujen (30 µm) huokosissa, kun taas sienet (2–20 µm) ovat pienten murujen (300 µm) väleissä ison murun sisällä (Six ym. 2004) (ks. Kuva 1). Huokoisten murujen eliöstö ja mikrobisto vahvistavat tehokkaasti murujen sisältämien mikromurujen sisäisiä ja välisiä tiloja. Elävät eliöt muodostavat sitovia rakenteita silloinkin kun kemialliset tai sähköiset sidosvoimat eivät saisi pidettyä mururakennetta koossa (Amézketa 1999).

Mikrobiston toiminta tuottaa lima-aineita sykkyksittäin (pulsseina) (Tang ym. 2011): ensin lisääntyvät helposti hajotettavan orgaanisen aineksen käyttäjät. Ne kasvavat nopeasti, kunnes kuluttavat ruokansa loppuun. Nopeiden mikrobien jälkeen sienet ja hitaammat hajottajabakteerit jatkavat orgaanisen aineksen hajotusta, mutta hyödyntävät nyt myös muodostunutta nopeiden hajottajien massaa. Hitaiden mikrobien toiminta tuottaa uusia lima-aineita, mikä vahvistaa murujen kestävyttä. Samalla hitaat hajottajat sitovat hiiltä pitkäaikaisempiin varastoihin murujen sisään (Vezzani ym. 2018).

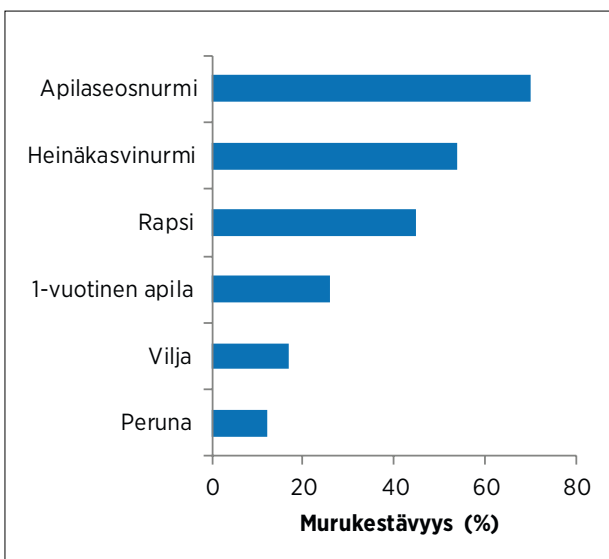
Viherlannoitusnurmien ja muiden maanparannukseen käytettyjen kasvustojen käyttö lisää maahan eloperäistä ainesta. Typensitojakasvien käyttö tuo maahan lannoitusvaikutuksen, mutta sen lisäksi aktivoi mikrobistoa tuottamallaan runsastyyppisellä kasvijätteellä. Typensidonta auttaa siten välillisesti myös hiilen kertymistä maaperään, kun aktiivinen mikrobisto tuottaa maahan kestäviä muruja (Roper ym. 2012). Typensitojakasvien kautta maahan kertyy myös orgaanista tyyppiä, joka lisää

hiilensidontaa, mikrobiaktiivisuutta ja murukestävyttä (Jensen ym. 2011).

Viherlannoituksen murukestävyttä lisäävä vaikutus on voimakkain mutta lyhyt (viikkoja). Suuri murukestävyys perustuu hajottajaeliöiden runsaaseen määrään, ja heikkenee mikrobimassan kuollessa ja hajotessa. Useita kuukausia kestävä vaikutuksen saa kuolleiden kasvijätteiden kuten olkien lisäyksellä. Vuosissa laskettavan murukestävyden saavuttaa lisäämällä kompostoitua lantaa tai muuta tuotetta, jossa raaka-aineet ovat jo pitkälti hajonneita ja muodostavat maassa heikosti hajoavaa pitkäikäistä humusta. [Monnier 1965 (Abiven ym. 2009 mukaan)]

Eri kasvien kyky vaikuttaa murukestävyteen on tunnistettu tieteellisessä tutkimuksessa jo varhain (Yoder, 1936). Aiheesta ei kuitenkaan ole tehty yhteenvetoa. Vaikutuksen suuruusluokkaa voi hahmottaa tanskalaisen neuvojooppaan tietojen avulla (Kuva 14) (Holmegaard, 1987).

Kasvien lisäksi muut eloperäiset ainekset lisäävät maan murustumista (Kuva 15). Erilaisia orgaanisia aineita lisäämällä saadaan mikrobisto aktivoitumaan ja tuottamaan kestäviä, suuria muruja. Maan mikrobisto muokkaa jatkuvasti maan rakennetta itselleen suotuisempaan suuntaan (Yazdanpanah ym. 2016). Mikrobisto kasvaa parhaiten suurimuruisessa maassa, jossa kaasujen vaihto on tehokasta ja maahengitykselle riittää runsaasti happea. Eloperäinen aines voi olla lantaa, maatalouskompostia tai muuta tilalla tai lähistöllä tuotettua materiaalia. Myös puukuidut, biohiili sekä esimer-



Kuva 14. Viljelykasvit murustavat maata kullekin lajille ominaisella tavalla, kuva vasemmalla. (Holmegaard 1987) Hyvin kasvava, tuuhea ja aktiivinen nurmen juuristo murustaa hyvin maata, kuva oikealla. Kuva: Jukka Rajala



Kuva 15. Runsaalla eloperäisen aineksen lisäyksellä ja sopivalla kuohkeutuksella maa murustuu hyvin. Vasemmalla hie-susavi ja oikealla hietamoreeni. Kuvat: Jukka Rajala.

kiksi yhdyskuntajätteistä valmistetut maanparan-usaineet ovat hyviä vaihtoehtoja maan mikrobis-ton ruokkimiseen ja murustumisen edistämiseen.

Lisätyn eloperäisen aineen määrä ja laatu vai-kuttavat maahan sitoutuvan hiilen määrään. Mu-rustumisen ja murujen kestävyys taas riippuvat hiilen lähteenä olevasta eloperäisestä aineksesta. Nopeasti hajotettava olki- ja lehtimassa tuo het-kellisesti aktiivisen mikrobitoiminnan, joka kui-tenkin hiipuu hajotettavan materiaalin loppuessa. Hitaammin hajotettavat ainekset kuten kompos-toitu massa, josta osa nopeasti hajoavista aineista on jo kulunut, auttavat sitomaan enemmän hiiltä maan pienmuruihin ja niiden pitkäaikaisvarastoon (Shahbaz ym. 2017).

Eri lannoitusvaihtoehdoilla on vaikutusta maan murujen jakaumaan ja kestävyYTEEN. Eloperäiset lannoitteet kuten karjanlanta ja siipikarjan lanta tuottavat enemmän kestäviä suurmuruja (halkaisi-ja >2 mm) kuin urea tai NPK-lannoite samansuu-

ruisilla typpimäärillä (150 kg N/ha) (Mohammed & Desta 2017). Myös maan vesitalouden ja fyysisten ominaisuuksien on osoitettu paranevan, kun lan-noituksessa on käytetty lantaa eikä mineraalilan-noitteita (Kiani ym. 2017).

Kasvit edistävät maan murustumista tarjoamal-la hajotettavaa eloperäistä ainetta, mutta myös suo-raan kasvunsa aikana. Juuret imevät maasta vettä kasvin käyttöön, mikä samalla kuivattaa maata. Jat-kuvasti kasvava juuristo myös sitoo juurikarvoillaan maan hiukkasia yhteen. Ravinteita maasta irrotta-essaan juuret erittävät maahan hiilipohjaisia yhdis-teitä (Amézketa 1999). Kasvi voi erittää hiiliyhdis-teinä maahan jopa 20 % kaikesta yhteyttämisessä tuottamastaan hiilestä (Hütsch ym. 2002). Näiden eritteiden pitoisuus on suurin juurten välittömäs-sä läheisyydessä, jolloin myös niiden murustava vaikutus on suurin samalla alueella (Galloway ym. 2018).

4 MURUKESTÄVYYS JA EKOSYSTEEMIN TOIMINTA

4.1 RAVINNEKIERTO

Ensimmäinen tarkasteltava ekosysteemin toiminnan ulottuvuus on ravinnekierto. Maan eloperäisestä aineesta vapautuu sen hajotessa ravinteita uudelleen kasvien käyttöön. Tämä ravinteiden kierto ylläpitää sekä kasvien että maaperän eliöstön elämää, joten orgaanisen aineksen ylläpito maassa on tarpeen.

Suuri osa maaperästä saatavista ravinteista on sitoutuneena maahiukkasten pinnoille. Maassa oleva murujen pinta-ala vaikuttaa siten ratkaisevasti ravinteiden sitoutumiseen ja saatavuuteen. Samassa tilavuudessa suuria tai pieniä muruja on erisuuruinen pinta-ala, jolta kasvi saa ravinteita. Pelkän pinta-alan lisäksi murun pinnan rakenne vaikuttaa sen ominaisuuksiin. Murujen sisäinen rakenne on tässä tärkeässä asemassa. Suurten murujen sisällä on pienempiä muruja, joiden sisälle on sitoutunut hiiliyhdisteitä. Suurten murujen huokoisuus ja kestävyys määrittävät, kuinka niiden sisältämät pienmurut ravinteineen ovat kasvien käytettävissä (Six ym. 2004).

Suuret 2–6 mm, huokoiset murut ovat hyvät ympäristö monipuoliselle mikrobitoiminnalle. Niissä kaasunvaihto on hyvää ja hajotustoiminta aktiivista. Kun mikrobeja on runsaasti, ne voivat siirtyä hajottamaan lisättyä eloperäistä ainetta nopeasti, jolloin ravinnekierto toimii tehokkaasti.

Ilmava ja hyvärakenteinen maa on hyvä kasvuympäristö myös juurille. Mitä laajemmin juuriston kasvi saa kasvatettua, sitä paremmin se saa käytettyä maassa heikosti liikkuvia ravinteita ja sitä vähemmän kasvi kuluttaa energiaa ravinteiden hankintaan. (Kuvat 14 ja 15)

Kasvien juuristo on aktiivisinta maan pintakerroksissa. Jos tämä kerros kuivuu tai tiivistyy, se heikentää ravinteiden saatavuutta pellolla. Hyväraenteisessa ja muruisessa maassa haihtuminen on vähäisempää ja kasvit saavat hyödynnettyä koko maaprofiilin ravinnevarantoja.

4.2 HIILEN KIERTO

Hiili on kaikkien kasvien, eläinten, mikrobien ja muiden eliöiden rakenteen perusta. Kasvit sitovat

yhteyttämisellä hiiltä ilmakehän hiilidioksidista sokereiksi ja solurakenteiksi. Muut eliöt käyttävät kasvien yhteyttämiä hiiliyhdisteitä energianlähteenään ja rakennusaineinaan. Kasvien juuret toimivat myös yhteistyössä tiettyjen sienilajien kanssa. Sienijuurisymbioosissa sieni kerää rihmastollaan kasville ravinteita ja kasvi luovuttaa sienelle hiiliyhdisteitä, joiden avulla sieni kasvattaa rihmastoaan. Näin kasvin sitomaa hiiltä päätyy maahan suurelle alueelle. Juuren ja sienirihmaston kuollessa niistä tulee maan orgaanista ainesta. Eläimet siirtävät hiiliyhdisteitä syömänsä rehun kautta lannaksi ja ruhoonsa. Viljelyjärjestelmässä nämä palaavat peltoon lantana tai esimerkiksi luujauhona. Nämä eloperäiset ainekset päätyvät maassa hajottajaeliöiden hajotettavaksi. Hajottajaeliöiden kuollessa niiden sisältämä hiili joko siirtyy seuraavalle hajottajalle tai hajottajia hyödyntävälle pedolle (alkueläimet, selkärangattomat, protistit ja sukkulamadot) tai jää maahan muruja yhdessä pitävinä lima-aineina. Osa orgaanisesta hiilestä sitoutuu tiukasti maan pienmurujen sisään ja on suojassa lopulliselta hajottamiselta (Six ym. 2004). Nämä kestävät hiilen muodot, vaikuttavat paljon maan kokonaishiilimäärään ja sitä kautta maan ominaisuuksiin.

Hiilen kierrossa jokainen välivaihe ja hiiltä käyttävä eliö tuottaa hiilidioksidia. Maaperän eliöiden tuottama hiilidioksidi vaikuttaa eliöiden kykyyn jatkaa toimintaansa. Ilmavassa maassa maahengitys voi olla hyvinkin aktiivista. Suuret huokokset tuovat happea eliöiden käyttöön, ja hiilidioksidi poistuu samaa reittiä maan ylempiin kerroksiin ja siitä ilmakehään. Jos maa on kovin tiivistä, ja murujen välissä ei ole riittävästi ilmaa, hiilidioksidi ja muut haihtuvat aineenvaihduntatuotteet eivät poistu. Tällöin maassa oleva happi kulutetaan loppuun, ja maan toiminnalle tärkeät happea tarvitsevat mikrobit (mm. lähes kaikki sienet) vähenevät. Myös kasvien juuret tarvitsevat happea voidakseen hyvin. Maan alla oleva hapettomuus voi syntyä maan tiivistyessä mekaanisesti, tai maan ollessa pitkään liian märkä. Jos vesi ei pääse poistumaan pellon huokosista, huokokset eivät täyty ilmalla. Hapettomat olosuhteet maassa edistävät hapettomiin oloihin sopeutuneiden mikrobien toimintaa. Niihin lukeutuvat mm. tyyppiä typpikaasuksi muuttavat denitrifikaatiobakteerit.

Liian ilmvassa maassa mikrobitoiminta on niin aktiivista, että maan kestävätkin hiilivarannot kulutetaan loppuun. Maanmuokkaus tai suuri hiekka-pitoisuus voi johtaa heikentyneeseen mururakenteeseen (Soinne ym. 2016). Tällöin murut hajoavat paljastaen sisälleen sitoutuneen hiilen. Tasaisen hajotuksen sijaan tämä paljastunut hiili joutuu alttiiksi voimakkaalle mikrobitoiminnalle. Mikrobisto kasvaa räjähdysmäisesti, ja kuluttaa orgaanisen aineksen loppuun.

Hiilen kierron kannalta hyvä murukestävyys ylläpitää kaasujen vaihtoon tarvittavaa huokostoa. Toisaalta se suojaa maamurujen sisälle varastoitunutta hiiltä liian nopealta hajotukselta.

4.3 VESITALOUS

Maan vesitalous, maassa oleva eloperäinen aines sekä mururakenne ovat yhteydessä toisiinsa (Manns ym. 2016) (Kuva 16). Orgaanisen aineksen rakenne on itsessään huokoinen, joten sen ympärille muodostuva pieneliöstön ja hajottajaeliöiden yhteen liimaama muru on myös huokoinen ja joustava. Maan pinnassa olevat orgaaniset murut kestävät sadetta lima-aineiden ansiosta. Ne eivät liety, jolloin maan pinta ei sateen loputtua kuoretu. Syvemmillä maan sisällä vesi varastoituu osin biologisen prosessien tuottamien murujen sisälle.

Jos pintamaan murut hajoavat, se heikentää veden imeytymistä voimakkaasti. Pintavalunta lisääntyy ja kasvien käyttökelpoisen veden osuus vähenee. Sitä osaa sadannasta, joka imeytyy maahan kasvien käyttöön kutsutaan hyötysadannaksi (efektiivinen sadanta) (Brouwer ja Heibloem, 1986). Maan pintakerroksen mururakenteen avulla voidaan saada suuri osa sadannasta hyödynnettyä kasvien käyttöön. Toisaalta hyvä mururakenne hidastaa haihtumista maassa, sillä 3-6 mm murujen väliin jäävät huokokset ovat niin pieniä, että ilmavirta ei pääse kuivattamaan niitä.

Eloperäisen aineksen laatu määrittää, kuinka hyvin vesi pääsee murujen sisään. Osa orgaanisista aineksista hylkii vettä. Turpoavilla mailla pieniin muruihin sitoutunut orgaaninen aines vähentää murujen vettymistä, jolloin murut eivät turpoa ja liety (Wu ym. 2017). Kuivana pysyvien murujen sisälle jää ilmataskuja. Niissä pieneliöstön hengitys



Kuva 16. Märkyys rikkoo mururakenteen ja maa liettyy vettä läpäisemättömäksi. Kuivatus tulee ensin saada hyväksi ennen kuin mururakennetta saadaan kestävämmiin parannettua. Kuva: Jukka Rajala.

jatkuu aktiivisena märissäkin olosuhteissa. Muruihin sitoutuva vesi tasoittaa pellon vesitilannetta. Pesusienimäiset eloperäiset murut luovuttavat vettä kuivina aikoina ja sitovat sitä sateisempina aikoina. Eloperäinen aines myös helpottaa veden nousua syvemmältä maasta. Maaperäeliöstö ja kasvien juuret tarvitsevat toimintaansa kosteutta. Kapillaarinen vedennousu pohjavedestä pellon pintaan ylläpitää biologista aktiivisuutta silloinkin, kun sadanta on ollut vähäistä ja pellon aktiivisin alue uhkaa kuivua.

5 MURUKESTÄVYYDEN MÄÄRITYS

5.1 LABORATORIOANALYYSIT

Maan murukestävyttä voidaan mitata eri menetelmin. Menetelmistä perinteisin on ns. märkäseulonta, jossa kostutettuja 2-4 mm muruja seulotaan eri seulojen (0,21 – 2 mm) läpi (Yoder, 1936; Nimmo ja Perkins, 2002). Seulonta tehdään ravistelemalla veteen upotettuja maanäytteitä 10 minuuttia 30 kertaa minuutissa, joten menetelmä on kohtalaisen raju murujen rikkomiseen. Yleensä 0,25 mm seulan läpi menneet murut lasketaan hajonneiksi, joten menetelmä kuvaa sekä murujen että pienmurujen kestävyttä (Kuva 1).

Märkäseulonnan avulla voidaan myös laskea keskimääräinen muutos murujen koossa. Tällöin esiseulotut 2-8 mm murut jaetaan eri jakeisiin 1,2,3,5 ja 8 mm seuloilla, punnitaan, kostutetaan ja märkäseulotaan, minkä jälkeen jakeet punnitaan uudelleen. Menetelmän avulla saadaan laskettua keskimääräinen muutos murujen koossa märkäseulonnan seurauksena sekä voidaan tunnistaa, minkä kokoluokan murut hajoavat herkimmin. Menetelmän haittapuolena on sen työläisyys, näytteen esikäsitteilyn lisäksi tarvitaan kaksi seulontaa ja punnitukset, joiden välissä näyte kuivataan. (Hartge ja Horn, 2009)

Tuoreempi laboratoriomenetelmä on ns. Woodsend VAST -murukestävyystesti (WoodsEnd Laboratories 2017), jossa kostutettua maata asetetaan 0,85 mm seulaan (20 mesh) ja upotetaan toistuvasti veteen. Upotuksen jälkeen mitataan, kuinka suuri tilavuus alkuperäisestä maanäytteestä on jäljellä (Kuva 17). Testi mittaa sekä seulan läpi mennyttä maajaetta että murujen tilavuuden muutosta.

Samanaikaisesti märkäseulontamenetelmän kanssa kehitettiin myös nopeammin toteutettavia murukestävyysmenetelmiä. Beste (1996 ja 2002) kehitti edelleen Sekeran ja Brunnerin (1943) maljamenetelmää. Menetelmässä seulotaan 2-7 mm muruja, jotka asetetaan kuoppalevymaljaan ja kastellaan varovasti tislattulla vedellä (Kuva 18). Minuutin seisotuksen jälkeen kuoppalevyä napautetaan kevyesti ja tarkastellaan, kuinka moni muruista on hajonnut (Kuva 19). Muruja pisteytetään sen mukaan ovatko ne pysyneet kokonaan ehjinä (2 pistettä) vai hajonneet osittain (1 piste). Muruja arvioidaan 20 kpl ja koe voidaan toistaa useamman kerran. Lopuksi murukestävyys arvioidaan jakamalla saatu pistemäärä maksimipisteillä (esim. 20 pistettä/40 pistettä = 50 % murukestävyys). Koska murujen kuivaaminen ja uudelleenkostutus vaikuttaa tuloksiin, Besten menetelmässä analyysi tehdään pelto-kohteille muruille.



Kuva 17. Liettämismenetelmässä mitataan seulalle jäänyt maan aineksen tilavuus. Kuva: Jaana Ravander.



Kuva 18. Kuoppalevytestissä murukestävyys määritetään laittamalla yksi muru pienen kuoppaan ja kostutetaan vedellä. Kuva: Jaana Ravander.



Kuva 19. Vasemmalla vettä hyvin kestäviä muruja, keskellä keskinertaisesti kestäviä muruja ja oikealla murujen veden kestävyys on heikko kuoppalevytestillä määritettynä. Kuva: Jaana Ravander.

5.2 VILJELIJÄHAVAITOMENETELMÄT

Laboratorioanalyysien lisäksi on erilaisia menetelmiä, joilla voidaan havainnollistaa murukestävyyttä pelto-olosuhteissa.

Yksinkertaisimmassa testissä otetaan pari maa-murua ja pudotetaan ne vesipulloon (HMI, 2002). Minuutin seisotuksen jälkeen pulloa ravistetaan kevyesti ja tarkastellaan, miten murulle kävi. Murukestävyys voidaan arvioida kolmiportaisesti: murut hajoavat minuutin seisotuksessa, murut hajoavat ravistettaessa tai murut kestävät myös ravistuksen. Menetelmän etuna on sen nopeus ja yksinkertaisuus. Haittapuolena on se, että parin murun otanta

on liian pieni murukestävyuden selvittämiseen. Esimerkiksi Besten menetelmässä tarkastellaan 20-40 murua. Otannan ongelma on suurin tilanteissa, joissa murukestävyys on suuri (pieni todennäköisyys pomia hajoavia muruja) tai pieni (pieni todennäköisyys pomia kestäviä muruja). Menetelmä toimii kuitenkin karkeana luokittelukeinona ja on helposti toistettavissa useammalle lohkolle.

Yhdysvalloissa on yleistynyt ns. liettämiskoe (*slake test*) (Kuva 20), jossa 5-10 cm maapaakku asetetaan karkean seulan päälle ja upotetaan tislattuun veteen (USDA NRCS, 2001). Menetelmän perusteella voi havainnoida, paljonko maata liettyy veteen ja kuinka paljon maata kertyy vesiestian pohjalle.



Kuva 20. Liettämissokeessa maapaakku laitetaan veteen harvan verkon päälle. Vasemmanpuoleinen näyte kestää hyvin vettä, vesi pysyy kirkkaana ja astian pohjalle karisee vain vähän maata. Oikeanpuoleisesta maanäytteestä maata putoaa runsaasti astian pohjalle ja osa liukenee veteen sementaen sen. Kuva: Jukka Rajala

5.3 MENETELMIEN VERTAILU OSMO KOELOHKOILLA

5.3.1 AINEISTO JA MENETELMÄT

OSMO -hankkeessa testattiin useampaa murukestävyyden menetelmää kolmen vuoden ajan 24 koelohkolla. Lohkoilta kerättiin kesällä maanäytteet, joista tehtiin murukestävyydestarkastelu Besten (1996 ja 2002) kuoppalevymenetelmällä. Lisäksi näytteen keruun aikana tehtiin pikapullotesti, jossa tarkasteltiin kahden murun kestävyyttä vesipullon avulla. Syksyllä kerättyistä maanäytteistä tehtiin Woodsend-laboratoriossa liettymistesti. Vuoden 2015 näytteessä testitulokset perustui punnitukseen ja vuosina 2016, 2017 ja 2018 tilavuusperusteiseen määrittelyyn (VAST). Vuoden 2015 tulokset poikkesivat merkittävästi myöhempien vuosien tuloksista etenkin multavammilla lohkoilla. Tämän johdosta jatkotarkastelu tehtiin vain vuosien 2016-2018 tuloksille.

5.3.2 LOHKOJEN VÄLISEROT

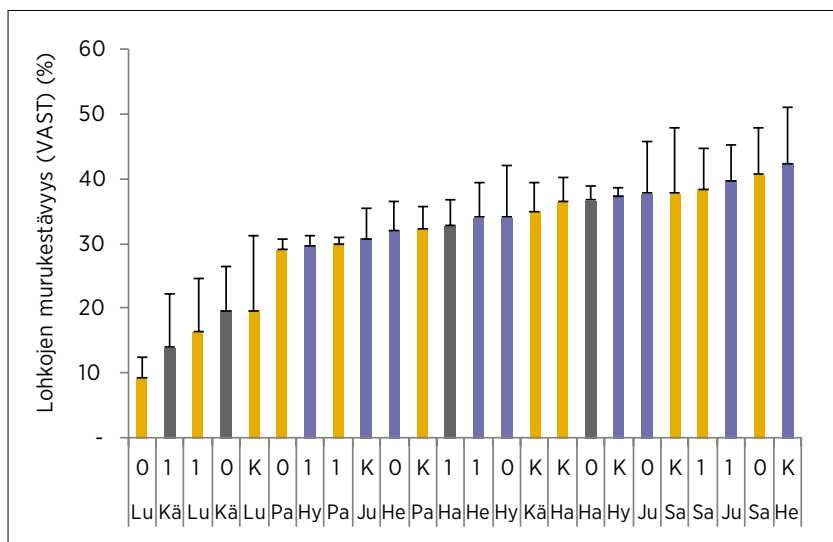
Tilavuuteen perustuvalla murukestävyyden menetelmällä määritettynä lohkojen murukestävyyden vaihteli keskimäärin 9 ja 42 % välillä (Kuva 21) Keskiarvo laskettiin 2016-2018 tuloksista lohkoittain. Heikoimmat murukestävyydet olivat voimakkaasti muokatuilla hietä- ja eloperäisillä lohkoilla (Lu, Pa, Kä). Suurimmat murukestävyydet olivat savilohkoilla (He, Ju) sekä hiesulohkoilla (Sa). Vaihtelu vuosien välillä oli vähäistä, paitsi lohkoilla He K sekä Lu ja Kä lohkoilla.

Kuoppalevymenetelmä antoi osittain päinvastaiset tulokset murukestävyyden suhteen (Kuva 22). Murukestävyyden vaihteli välillä 47-99 %. Suurimmat

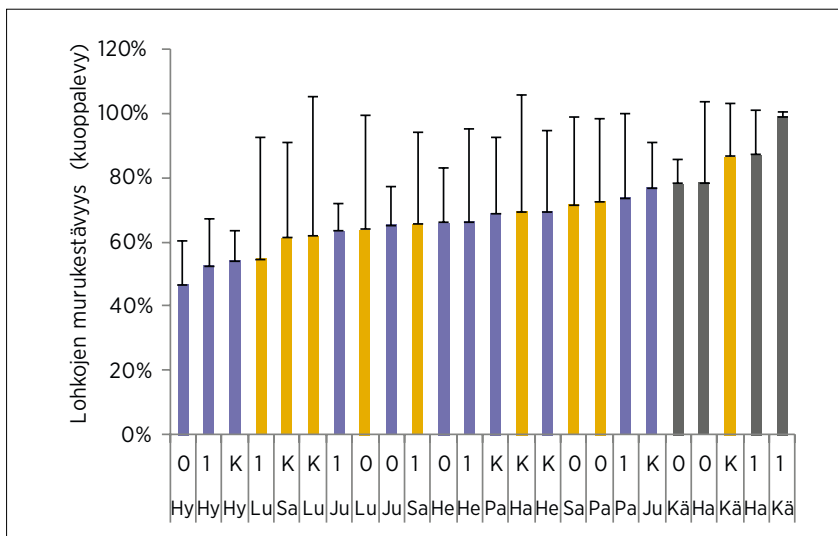
murukestävyydet olivat eloperäisillä lohkoilla (Ha 0,1, Kä 0,1) ja yhdellä hietalohkolla (Kä K). Alhaisimmat murukestävyydet olivat Hy – savilohkoilla ja Lu 1 hietalohkolla.

Vastaavuus kuoppalevymenetelmän ja tilavuusmenetelmän välillä vaihteli vuosittain (Kuva 23). Vuonna 2016 menetelmien välillä oli kohtalainen vastaavuus (selitysaste $R^2=0,52$), mutta vuonna 2017 selitysaste jäi heikoksi ($R^2=0,09$) ja vuonna 2018 selitysaste oli kohtalainen $R^2=0,42$, mutta korrelaatio käänteinen, eli menetelmät antoivat päinvastaisia tuloksia. Suurimmat poikkeamat olivat lohkoilla, joissa tilavuuspohjainen menetelmä arvioi murukestävyyden erittäin heikoksi (<15 %), mutta kuoppalevymenetelmässä kestävyys oli korkea. Lohkot olivat eloperäisiä turvemaita sekä kuorettuneita hietamaita, joissa vain pieni osa maanäytteen tilavuudesta voitiin käyttää kuoppalevymenetelmään. Näissä maissa ehjiksi jääneet murut olivat kestäviä, mutta ehjäksi jääneitä muruja oli vain pieni osa koko maasta.

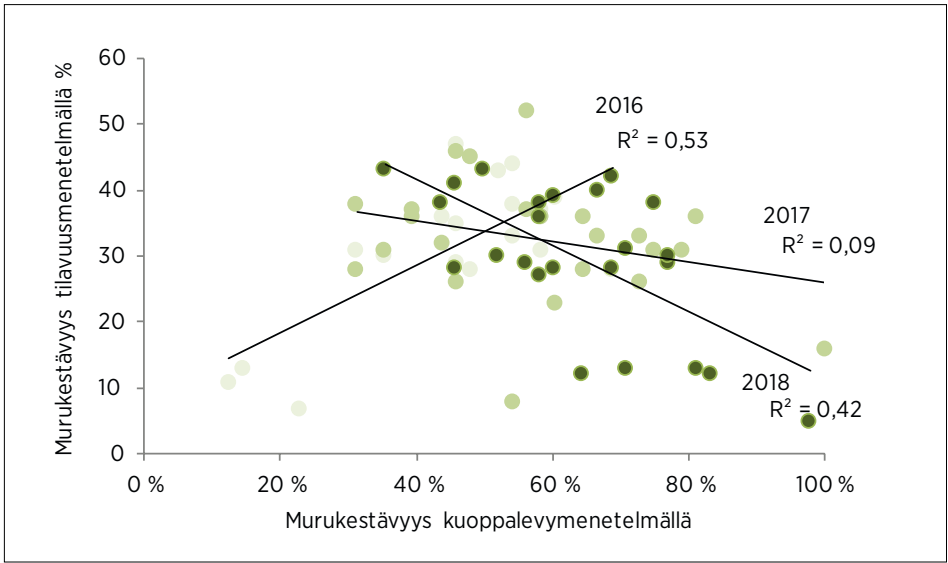
Besten menetelmässä suositellaan murujen analysointia kosteana, mutta käytännön järjestelyistä johtuen OSMO -hankkeen näytteet analysoitiin ilmakuivista muruista. Mittausvirheen arvioimiseksi vuoden 2017 näytteistä määritettiin myös murukestävyys välittömästi näytteen oton jälkeen. Tulosten perusteella kuivatun näytteen käyttö aliarvioi murukestävyyttä kosteaan näytteeseen verrattuna (Kuva 24). Lisäksi vastaavuus kuivatujen ja kosteiden näytteiden välillä on alhainen. Vastaavuus kosteiden näytteiden ja laboratorioissa määritetyn tilavuuspohjaisen murukestävyyden välillä oli kuitenkin myös heikko, joten kosteista muruista tehty määrittely ei korvaa laboratorio-määrittelyä.



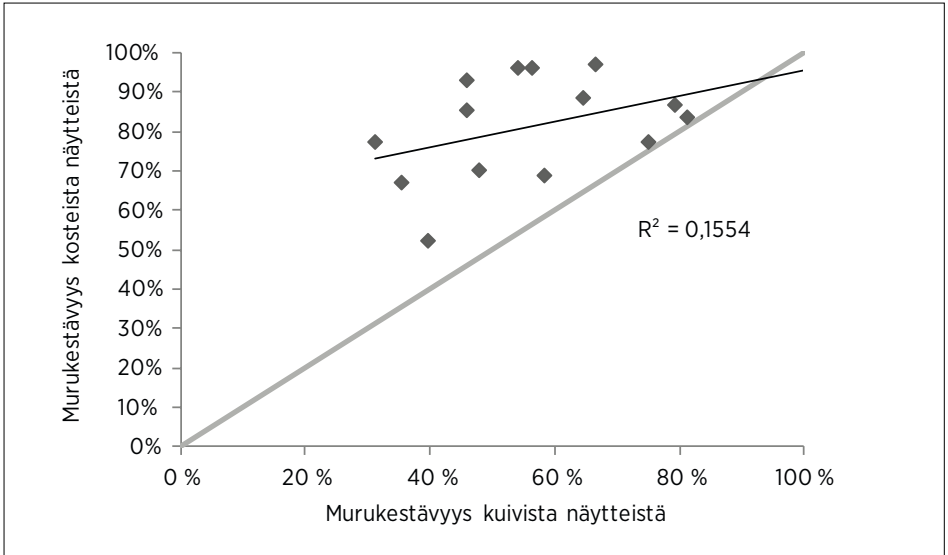
Kuva 21. Lohkot järjestettynä Woodsend-laboratoriossa määritetyn murukestävyuden perusteella OSMO -hankkeen koelohkoilla vuosina 2016-2018 (palkki kuvaa vuosien keskiarvoa, keskihajonta palkin päällä). Sininen = savi, keltainen = hieta tai hiesu, harmaa = eloperäinen.



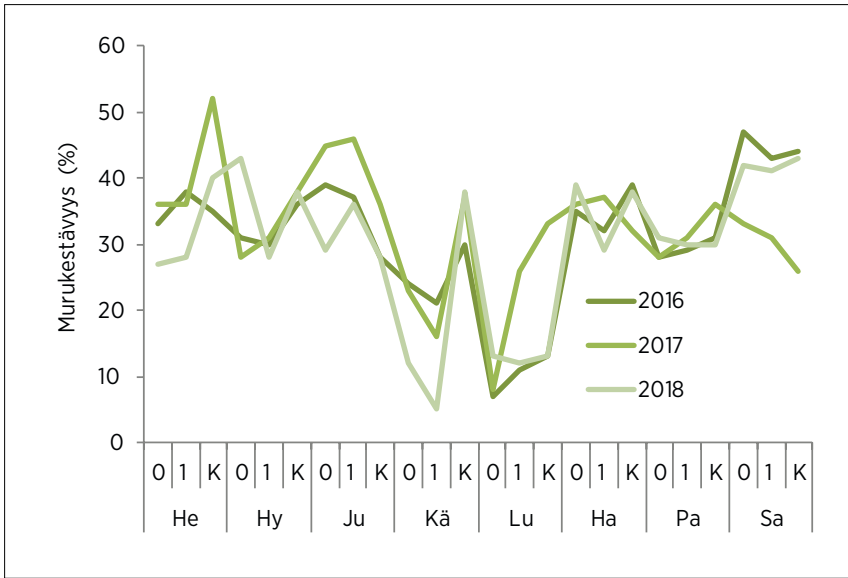
Kuva 22. Lohkot järjestettynä kuoppalevytestillä määritetyn murukestävyuden mukaan OSMO -hankkeen koelohkoilla vuosina 2016-2018 (palkki kuvaa vuosien keskiarvoa, keskihajonta palkin päällä). Sininen = savi, keltainen = hieta ja hiesu, harmaa = eloperäinen.



Kuva 23. Korrelaatio kuoppalevy menetelmän ja tilavuuspohjaisen tarkastelun välillä vuonna 2016 (vaalea), 2017 (keskivaalea) ja 2018 (tumma) tehdyillä näytteillä koelohkoilla.



Kuva 24. Kuivilla ja kosteilla muruilla arvioidun murukestävyuden välillä ei ole juurikaan vastaavuutta. Kattokivi kuvaa täydellistä 1:1 vastaavuutta. Kosteilla muruilla arvioitu murukestävyys on korkeampi kuin kuivilla muruilla arvioitu.

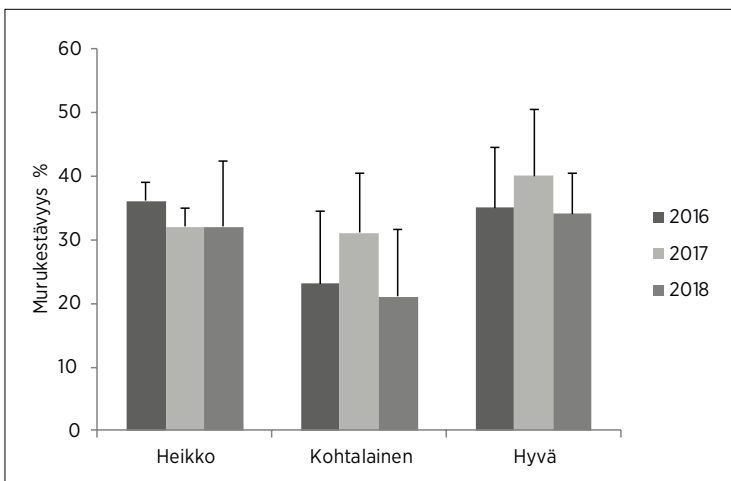


Kuva 26. Muutokset murukestävydessä tilavuusperusteisen analyysin perusteella määritettynä 2016-2018.

5.4.4 KORRELAATIO MULTAVUUDEN JA PELTOHAVAINTOJEN KANSSA

Murukestävyden määrittäminen laboratoriotestillä vie aikaa. Edustavan näytteen käsittely ja lähetys sekä laboratorioanalyysi on työlästä, mikä rajoittaa tehtävissä olevien analyysien määrää. Jos murukestävyys voitaisiin arvioida nopeasti maastossa, se mahdollistaisi lohkon murukestävyden seurannan osana kasvukauden aikana tehtävää kasvuston ja maan kasvukunnon havainnointia. Tulosten pe-

rusteella yksinkertainen testi, jossa tarkastellaan muutaman murun hajoamista vesipullossa ei kuvaa maan murukestävyttä samalla tavalla kuin laboratoriomäärittäminen (Kuva 27). Havaintomenetelmissä heikon murukestävyden lohkot saattoivat olla murukestävydeltään parempia kuin hyväksi arvioidut lohkot. Menetelmän luotettavuus on heikko ja sitä olisi hyvä täydentää ottamalla maanäytteitä eri puolilta lohkoa ja tarkastelemalla useampaa murua esimerkiksi Besten menetelmällä.

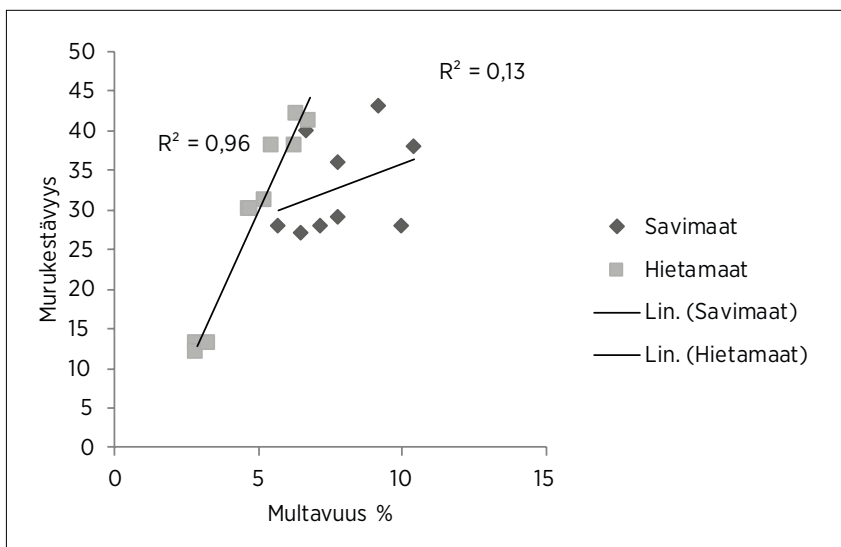


Kuva 27. Pelloilla muutaman murun luokittelulla hahmoteltu murukestävyysluokka ei vastannut laboratoriossa määritettyä murukestävyttä 24 OSMO -koelohkolla. (Heikko = muru hajoaa vesipullossa alle minuutissa, kohtalainen = muru hajoaa ravistuksessa, hyvä = muru ei hajoa minuutin seisotuksella eikä ravistuksella).

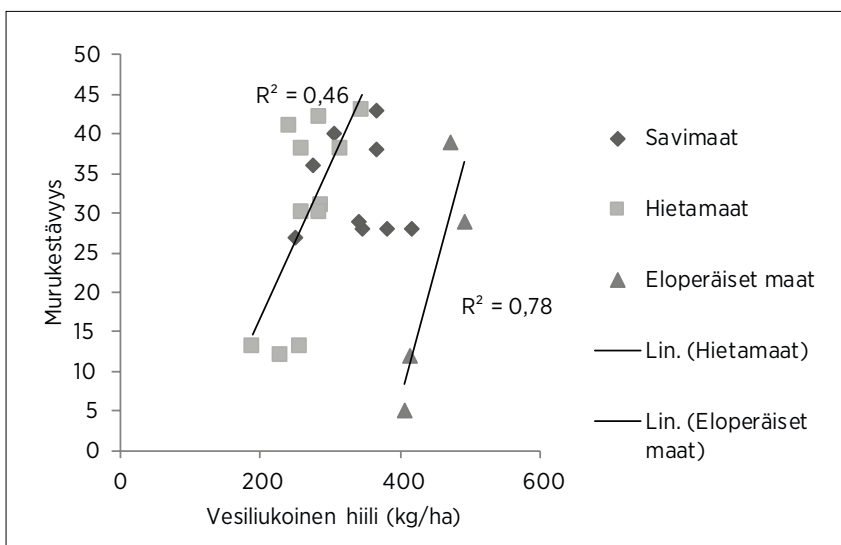
Hieta- ja hiesumailla murukestävyys vastasi maan multavuutta (Kuva 28). Savimailla korrelaatio oli selvästi heikompaa. Murukestävyys savimailla ei myöskään vastannut maan kalsiumin tai magnesiumin osuutta kationinvaihtokyvystä. Samanlaisia murukestävyksiä mitattiin pelloilta, joissa kalsiumin osuus oli alhainen (58 %) kuin huomattavan korkea (81 %). Vaikuttaisi siltä, että savimailla muut

tekijät kuin kokonaismultavuus tai kalsiumin osuus määrittävät murukestävyys.

Vesiliukoisien hiilen voisi olettaa vastaavan paremmin murukestävyyttä. Hieta- ja eloperäisillä mailla selitysaste oli kohtalainen, mutta savimailla vaihtelu oli suurta eikä sitä voitu selittää vesiliukoisien hiilen määrällä (Kuva 29).



Kuva 28. Savimailla multavuus selitti vain pienen osan murukestävyys vaihtelusta vuoden 2018 näytteissä koelohkoilta. Hietamailla murukestävyys oli selvemmin sidoksissa multavuuteen.



Kuva 29. Vesiliukoisien hiilen määrä kuvasi kohtalaisesti murukestävyyttä hietamailla ja eloperäisillä mailla OSMO hankkeen koelohkoilla vuoden 2018 näytteissä, mutta savimailla havaittu vaihtelu johtui muista tekijöistä kuin vesiliukoisesta hiilestä.

6 YHTEENVETO

Maan murukestävyys on keskeinen tekijä maan toimintakyvyn kannalta. Hyvä murukestävyys edistää mikrobitoimintaa, ylläpitää kaasunvaihtoa ja vesitaloutta sekä mahdollistaa kasvien hyvän kasvun. Maan murukestävyttä voi kehittää ja ylläpitää viljelytekniikan avulla. Viljelytekniikassa on huomioitava maan kemiallinen tila (kalkitus, ravinnesuhteet), fyysikaalinen tila (muokkaus, kuivatus) ja biologinen tila (juuristo, maaperäeliöt, lisätty eloperäinen aines). Maan murukestävyuden hoitomenetelmät ovat kytköksissä koko viljelyjärjestelmään,

sen johdosta murukestävyys on hyvä indikaattori maan kasvukunnolle.

Peltokokeissa ei valitettavasti saatu hyvää vastaavuutta laboratoriomenetelmien ja erilaisten havaintomenetelmien välille. Murukestävyuden luotettava arviointi on edelleen haastavaa ja kaipaisi menetelmäkehitystä. Viljelijä- ja neuvojakäyttöön Besten menetelmä, jossa arvioidaan 20-40 murun kestävyttä vaikuttaisi käyttökelpoiselta keinolta lohkojen välisen eron ja lohkojen ajallisen kehityksen seurantaan.

LÄHTEET

- Abiven S., Menasseri S. & Chenu C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1-12
- Amézketa E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83-151
- Beste, A. 1996. Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren im ökologischen Landbau auf Bodenstruktur und Wasserhaushalt. Diplomityö, Geographisches Institut der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- Beste, A. 2002. Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. *Väitöskirja, Justus-Liebig yliopisto Giessen*, 136 sivua.
- Beste A. 2006. Qualitative soil analysis – toolkit for farmers. Institute for Soil Conservation & Sustainable Agriculture, Mainz, Germany
- Birkás, M., 2014. Book of soil tillage. Szent Istvan University Press, Budapest, Unkari. 322 s.
- Blanco-Canqui H. & Lal R. 2009. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28: 139-163
- Brouwer ja Heibloem, 1986. Irrigation water management, FAO. www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e00.htm
- D'Hose T., Ruysschaert G., Viaene N., Debode J., Nest T. V., van Vaerenbergh J., Cornelis W., Willekens K. & Vandecasteele B. 2016. Farm compost amendment and non-inversion tillage improve soil quality without increasing the risk for N and P leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 225: 126-139
- Diouf, B. E. Skidmore, L., Layton, J. B. ja Hagen, L. J., 1990. Stabilizing fine sand by adding clay: Laboratory wind tunnel study. *Soil Technology* 3: 21-31.
- Dontsova, K.M. ja Norton, L.D., 2002. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Science* 167(3): 184-193.
- Galloway A. F., Pedersen M. J., Merry B., Marcus S. E., Blacker J., Benning L. G., Field K. J. & Knox J. P. 2018. Xyloglucan is released by plants and promotes soil particle aggregation. *New Phytologist* 217: 1128-1136
- Hartge, K.H. ja Horn, R. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. 4. painos, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers
- HMI, 2002. Holistic Management biological monitoring manual. Holistic Management International, Albuquerque, Yhdysvallat, 57 s.
- Holmegaard J. 1987. Groengødding og efterafgrøder. Skarvs Landbruksserie. Skarv Publications, Holte 224 s.
- Horton, R., Bachmann, J. ja Peth, S., 2016. Essential Soil Physics: An Introduction to Soil Processes, Functions, Structure and Mechanics. 1. painos, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2016.
- Hütsch B. W., Augustin J. & Merbach W. Plant rhizodeposition – an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165: 397-407
- Jensen, E.S., Peoples, M.P., Boddey, R.M., Greshoff, P.M., Hauggaard-Nielsen, H., Alves, B.J.R. ja Morrison, M.J., 2012. Legumes for Mitigation of Climate Change and the Provision of Feedstock for Biofuels and Biorefineries. *A Review. Agronomy for Sustainable Development* 32, 329-64.
- Kainiemi V., Arvidsson J. & Kätterer T. 2015. Effects of autumn tillage and residue management on soil respiration in a long-term field experiment in Sweden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178: 189-198
- Keller T., Sveriges lantbruksuniversitet. 2016. Luentokalvot: Optimaalinen kosteus muokkaukselle ja eri muokkauksien veto-voiman tarve. Kurssilla Maan rakenne, tiivistyminen ja muokkaus 18.11.2016. <http://luomu.fi/tietopankki/wp-content/uploads/sites/4/2017/10/Keller-18-Nov-Maan-muokkaus-Fin3.pdf> Viit. 8.02.2018
- Kværn S. H. & Oygarden L. 2006. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway. *Catena* 67: 175-182

- Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K. & Leinweber P. 2008. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 61-82.
- Liu, Z., Li, Z., Zhong, H., Zeng, G., Liang, Y., Chen, M., Wu, Z., Zhou, Y., Yu, M. ja Shao, B., 2017. Recent advances in the environmental applications of biosurfactant saponins: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (6): 6030–38.
- Manns H. R., Parkin G. W. & Martin R. C. 2016. Evidence of a union between organic carbon and water content in soil. *Canadian Journal of Soil Science* 96: 305-313.
- Mohammed Y. A. & Kefyalew G. D. 2017. Nutrient sources and harvest frequencies impact water stable soil macro-aggregates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48: 2359-2367.
- Panabokke C. R. & Quirk J. P. 1957. Effect of initial water content on stability of soil aggregates in water. *Soil Science* 83: 185-195.
- Rahman M. T., Guo Z. C., Zhang Z. B., Zhou H. & Peng X. H. 2018. Wetting and drying cycles improving aggregation and associated C stabilization differently after straw or biochar incorporated into a Vertisol. *Soil & Tillage Research* 175: 28-36.
- Ritchey, K. D., Norton, L. D. Hass, A. Gonzalez, J. M. ja Snuffer, D. J., 2012. Effect of Selected Soil Conditioners on Soil Properties, Erosion, Runoff, and Rye Growth in Nonfertile Acid Soil, *Journal of Soil and Water Conservation* 67 (4): 264–74.
- Roper M. M., Milroy S. P. & Poole M. L. 2012. Green and brown manuring in dryland wheat production systems in Mediterranean-type environments. *Advances in Agronomy* 117: 275-305.
- Schmidt, M. 2016. Kalkdüngung gesunde Ackerböden - optimale Erträge. DLG-Verlag, Frankfurt.
- Sekera, F. ja Brunner, A., 1943. Beiträge zur Methodik der Gareforschung. *Zeitschrift für Pflanzernährung und Bodenkunde* 29: 196-212 (Beste, 2002 mukaan).
- Shahbaz M., Kuzyakov Y. & Heitkamp F. 2017. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. *Geoderma* 304: 76-82.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S. & Deneff K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79:7-31.
- Six J. & Paustian K. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology & Biochemistry* 68: A4-A9.
- SMI, 2002. Target on crop establishment. DEFRA, SMI, Chester, Iso-Britannia.
- Soinne H., Hyväluoma J., Ketoja E. & Turtola E. 2016. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for aggregate stability of post-glacial clay soils. *Soil & Tillage Research* 158: 1-9.
- Tang J., Mo Y., Zhang J. & Zhang R. 2011. Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability. *Applied Soil Ecology* 47: 153-159.
- Uusitalo, R., Ylivainio, K., Hyväluoma, J., Rasa, K., Kaseva, J., Nylund, P., Pietola, L. ja Turtola, E., 2012. The effects of gypsum on the transfer of phosphorus and other nutrients through clay soil monoliths. *Agricultural and Food Science* 21 (3): 260–278.
- USDA NRCS, 2001. Soil quality test kit guide. USDA NRCS, 88 s.
- Wang Y., Cui Y.-J., Tang A. M., Benahmed N. & Duc M. 2017. Effects of aggregate size on the compressibility and air permeability of lime-treated fine-grained soil. *Engineering Geology* 228: 167-172.
- WoodsEnd Laboratories 2017, <https://solvita.com/soil/vast/> Viit. 12.6.2017.
- Wu X., Wei Y., Wang J., Wang D., She L., Wang J. & Cai C. 2017. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. *Catena* 156: 205–215.
- Yoder, K.E., 1939. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion. *J.Am.Soc.Agron.* 28: 337-351.

LIITE 1 Ohjeet Murukestävyys määrittämiseen kuoppalevytestillä

Kuvat **Jaana Ravander**

TARVIKKEET

- pieni lapio (esim. istutuslapio, lasten hiekkalappio)
- litran pakastuspusseja / maanäyterasioita
- permanenttitussi
- seula / lävikkö (esim. lasten hiekkasihti, pasta-lävikkö, muu astia n. 2 mm reiällä)
- pinsetit
- kuoppalevyjä, yhteensä n. 48 kuoppaa (kirkkaita/vaaleita monikuoppaisia levyjä, esim. jääpalamuotteja)
- muovipullollinen vettä (0,5 l)
- kamera



VALMISTELU

- Ota yksi pussi/maanäyterasia näytteenottoaika kohti. Merkitse pussiin valmiiksi näytteenottoaika nimi, niin sinun ei tarvitse pellolla näytettä ottaessa alkaa kirjoittaa tietoja ylös. (Voi olla hyvä ottaa maanäyte sekä hyvä- että huonokasvuisesta osasta lohkoa, joten voit tehdä lohkolle useamman pussin, kunhan pystyt erottamaan ne myöhemmin toisistaan.)
- Varaa pöytätilaa kuoppalevytestiä varten. Helposti siivottava paikka on paras, koska testissä helposti roiskuu vettä ja maata lähistölle.
- Tee vesipullon korkkiin pieni, n. 1 mm reikä

MAANÄYTTEIDEN KERUU PELLOLLA

- Ota pikkulapiolla pintamaata n. 0-4 cm syvyydeltä haluamastasi kohdasta peltoa. Laita näyte valmiiksi merkittyyn pussiin, ja ota sen jälkeen metrin säteeltä 2-4 näytettä lisää samaan pussiin. Näin saat kattavamman tuloksen hyvä-/huonokasvuisen alueen maan pintarakenteesta.
- Havainnoi maan kosteutta. Onko pintamaa kuiva vai kostea? Tieto kannattaa merkitä ylös, samoin jos huomaat maanpinnassa esim. kuorettumaa tai halkeamia.
- Sulje pussi solmulla, ja jatka seuraavaan näytteenottoaikaan.



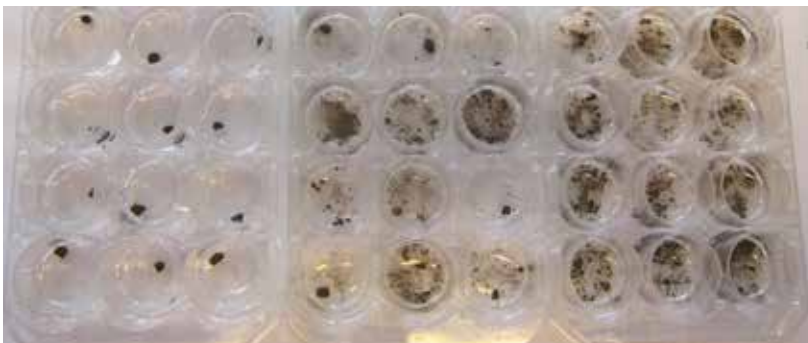
TESTIN TEKEMINEN

Kun kaikki näytteet on kerätty, voit aloittaa testin teon.

Mikäli et ehdi tehdä testiä pian näytteiden keruun jälkeen, voit säilyttää maanäytteitä jääkaapissa muutaman päivän. Huolehdi, etteivät näytteet kuivu, vaan pysyvät samassa kosteudessa kuin pelloilta kerättäessä. Suurempaan muovipussiin kääriminen on hyvä keino estää veden haihtuminen. Suojaa näytteet myös valolta, etteivät maan mukana mahdollisesti tulleet siemenet ala itää.



1. Seulo näyte. Testi tehdään noin 2-5 mm muruilla. Kaada yksi näytepussi sihtiin ja heiluttele sitä varovasti saadaksesi liian hienojakoiset maat pois. Poista käsin myös liian suuret murut ja paakut. Älä hajota suuria paakkuja pienemmiksi.
2. Poimi testattavat murut. Ota seulalle jääneitä muruja pinseteillä, ja aseta kukin yksittäin kuoppalevyn kuoppaan. Älä valikoi tiettytyyppisiä muruja, vaan ota kaikkia läpimitaltaan sopivia (2-5 mm). Varo puristamasta muruja rikki.
3. Veden lisäys. Lisää jokaiseen kuoppaan vettä puristamalla muovipullosta vesinoro korkkiin tehdyn reiän läpi. Älä suihkuta suoraan murun päälle. Suuntaamalla suihkun kuopan reunoihin, saat veden osumaan muruun pehmeästi. Lisää akku- tai sadevettä kunnes muru peittyy kokonaan.
4. Vaikutusaika. Veden lisättyäsi odota 1 min ajan heiluttamatta levyä. Vesi imeytyy murun sisään. Sitten napauta levyä kevyesti.
5. Murujen kestävyyspisteytys. Yhteensä kahden minuutin odotusajan jälkeen ota kuva levyistä myöhempää tarkastelua varten. Sen jälkeen arvioi, kuinka kukin muru selvisi testistä. Vertaa näkemääsi esimerkkikuviin (seuraava sivu), ja pisteytä jokaisen murun murukestävyys. (Ehjänä pysynyt muru saa 2 pistettä, osittain hajonnut, jossa kuitenkin yhtenäisiä pikkumuruja saa 1 pisteen, ja täysin liettynyt muru 0 pistettä.)
6. Kestävyysprosentin laskeminen. Laske kaikkien murujen kestävyyspisteet yhteen, ja jaa se maksimipistemäärällä. (Maksimipisteet saat laskemalla testissä olleiden kuoppalevyn kuoppien määrän, ja kertomalla sen yksittäisen kuopan maksimipisteellä 2) Kerro tulos 100:lla muuttaaksesi lukeman kestävyysprosentiksi.
7. Vertaa tulostasi maalajikohtaisiin ohjearvoihin. Saatuaasi murujen kestävyysprosentin, katso Besten esimerkkiarvoista, millaisen arvosanan maanäytteesi saa. Maalajilla on suuri vaikutus maan kykyyn murustua, joten varmista että katsot arvosanan oikean maalajin kohdalta.
8. Toista testi muille näytteille.

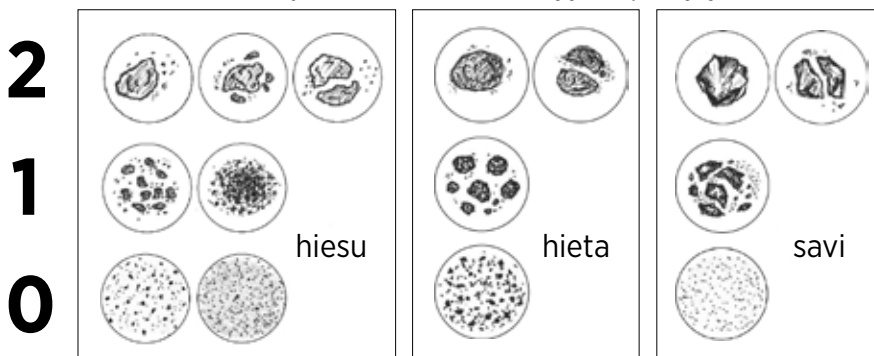


Murukestävyys kertoo paljon maan hyvinvoinnista. Kestävät murut luovat maan ja ilman väliin huokaisen rajapinnan, josta sadevesi pääsee alaspäin, maassa syntyvä hiilidioksidi ylöspäin, ja jonka kautta viljelykasvin on helppo itää. Kestävät murut kertovat maan pieneliöstön voivan hyvin. Muru koostuu pääasiassa hienojakoisesta kiviaineksesta, jota maamikrobien liima-aineet, kasvin juurten eritteet ja maaperässä elävien sienten rihmat pitävät koossa. Hyvä rakenteinen muru on kuin pesusieni: huokoinen ja joustava, mutta kuitenkin kestävä. Huokoinen rakenne on täynnä aktiivisia pintoja, joille tarttuneita ravinteita ja vettä kasvi saa kerättyä juurillaan. Hyvin murustuneessa maassa juurten on helppo kasvaa joka suuntaan, ja kerätä tarvitsemiaan ravinteita laajalta alueelta.

Tiivistyneessä maassa voi myös olla kestäviä muruja. Tiivistyneen maan murut eivät kuitenkaan vastaa ominaisuuksiltaan hyvinvoivan maan muruja. Nämä teräväreunaiset tiiviit murut ovat syntyneet massiivisemmasta tiivistymästä roudan, kuivumisen tai mekaanisen rikkomisen (koneellinen maanmuokkaus) seurauksena. Niissä ei ole vettä ja ravinteita sitovaa huokostilaa. Huokosten puuttuessa kasvi ei saa kasvatettua juuriaan murujen sisään, ja saa näin ollen kerättyä ravinteita vain murun ulkopinnalta. Murun sisäosa voi olla hapeton, ja sulkea tiukasti sisäänsä kasvien käyttöön tarkoitetut ravinteet.

Tiivistyneen maan muruissa ei ole aktiivista biologista toimintaa, joten niissä ei synny liima-aineita. Tästä syystä murut eivät kestä. Sateella vesi hajottaa murut, kun pisaran isku ja muruun siirtyvä vesi irrottavat hienoainekset toisistaan. Kaikkein hienoin aines lähtee veden mukana. Se kerrostuu joko syvemmälle maahan tai paikkaan, jonne vesi laskee. Maan pintaan jäävä aines painuu tiiviiksi kerrokseksi. Kuorimainen kerros estää veden imeytymisen maahan, mikä entisestään lisää veden virtausta maan pinnalla. Sateen loputtua kuori kovettuu, ja maan kaasujenvaihto heikkenee. Itävän siemenen on vaikea päästä kuoren läpi.

Maalajikohtainen murukestävyys pisteytys



Mukaillen A. Beste 2001

Murukestävyysluokitus eri maalajeilla.

Mukaillen A. Beste 2001

	hiesu	hieta	savi
hyvä	70-100	60-100	80-100
keskinkertainen	50-60	30-50	60-70
alhainen	<40	<20	<50

LIITE 2 Ohjeet Murukestävyuden määrittämiseen teesihtitestillä

Kuvat **Jaana Ravander**

TARVIKKEET

- teesihti tai muu n. 1 mm rei'illä oleva siivilä
- 5 ml mittalusikka (teelusikka)
- pieni suppilo (mitoitus teesihtin mukaan)
- neulattomia lääkeruiskuja (5 ml) tai kirkasta letkua (halkaisija suppilon putken mukaan)
- pikaliimaa
- vettä
- muoviluvahaa/sinitarraa/reikätiili ruiskujen pidikkeeksi



VALMISTELU

- Poista ruiskuista männät, ja tuki niiden kapea pää pikaliimalla koko matkalta (ruiskun pohja tasaiseksi, jotta mitta-asteikko on luotettava). Anna kuivua seuraavaan päivään.
- Mikäli et käytä ruiskuja vaan kirkasta muoviletkua, tee letkuun mitta-asteikko tulosten lukemista helpottamaan. Voit esimerkiksi piirtää merkit 2 mm välein viivoitinta apuna käyttäen.
- Kerää maanäytteet (ohjeet kuoppalevytestin työohjeessa), ja hienonna maanäytteen suuremmat murut ja kokkareet tasaiseksi hienohkoksi muruksi ("mankelointi/kaulinta"). Tavoitteena saada korkeintaan murukahvin karkeutta vastaava jauhe, jotta mittalusikalliseen tulee aina yhtä suuri määrä maata.



Maat ovat rakenteeltaan hyvin erilaisia. Karkeimpia joutuu hienontamaan, jotta mittalusikalla saa mahdollisimman tarkasti mitattua 5 ml näytettä testiin.

TESTIN TEKEMINEN

Varaa kaikki tarvikkeet käden ulottuville.

1. Kiinnitä suppilon päähän lääkeruisku/asteikollinen muoviletku, ja täytä molemmat vedellä. Mikäli käytät muovilettoa, purista letkun pää kiinni mittastaasteikon alapäästä.
2. Ota mittalusikallinen maata (tasapäinen lusikallinen, älä tiivistä) sihtiin.
3. Kasta sihtiä suppilossa olevaan veteen. Pidä tahti rauhallisena, ja kasta sihtiä 8 kertaa nostoen sen välissä pois vedestä. Maa-ainesta alkaa liettyä, ja osa valuu suppilosta ruiskuun/letkuun.
4. Pyyhkäise sihdin pohjaa suppilon reunaan (viimeinen tippa, jossa irtonaista maa-ainesta lasketaan ensimmäiseen mittaukseen), ja aseta sihti syrjään.
5. Anna maa-aineksen valua suppilosta ruiskuun, ja anna näytteen tasaantua. Voit varovasti naputella suppiloa, jotta saat kaiken hienojakoisen aineksen siirtymään suppilosta ruiskuun.
6. Lue ruiskun mitta-asteikosta irronneen maa-aineksen määrä, ja kirjaa se muistiin.
7. Kaada loput sihdissä olevat maa-ainekset suppilon kautta samaan ruiskuun. Anna jälleen tasaantua (voit varovasti irrottaa ruiskun suppilosta ja laittaa sen pidikkeeseen laskeutumaan).
8. Lue ruiskun mitta-asteikosta maanäytteen kokonaistilavuus, ja kirjaa se muistiin.
9. Toista testi muille näytteille.
10. Laske helposti liettyvän maa-aineksen osuus jakamalla ensimmäinen mittaustulos jälkimmäisellä. Kerromalla tuloksen 100:lla saat tuloksen prosenttiosuudeksi, eli kuinka monta prosenttia maasta on helposti liettyvää.



Maanäyte kaadettu sihtiin, valmiina nostakasta-työvaiheeseen (kohta 3)

Liettyvä maa-ainekset on altis kuorettumaan, sekä lähtemään sadeveden mukana pois pelloilta. Kaikkein hienojakoisin aines voi kulkeutua veden mukana syvemmälle maan kerrokseen, muodostaen kyntöanturaa vastaavan vettä läpäisemättömän kerroksen maan sisään.



Maanäytteen tilavuudet eri työvaiheissa: vasemmalla mittalusikallinen kuivaa maata, keskellä helposti liettyvä osuus (kohta 6), oikealla liettynyt maa sekä loppunäyte (kohta 8)

LASKUKAAVA, esimerkkilaskelma

Kuvitellaan vasemmalla olevan kuvan näytteiden olevan sama näyte eri työvaiheissa.

Mittalusikalla on mitattu 5 ml maata (vasen ruisku), siitä on sihdattu kohtien 3–6 mukaisesti liettyvä osuus (keskimääräinen ruisku), ja sen jälkeen kaadettu sihtiin jääneet maa-ainekset suppilon kautta samaan ruiskuun kohdassa 7–8 (oikea ruisku). Nyt lasketaan liettyvän maa-aineksen osuus:

$$\text{liettyvää maata} = \frac{0,5 \text{ ml}}{4,5 \text{ ml}} \times 100\% = 11,1\%$$

Näytteen maa-aineksesta helposti liettyvää on 11,1%.

