

Elämästä humusta - humuksesta elämää

Humus – product and source of life

Helinä Hartikainen

Department of Applied Chemistry and Microbiology, Box 27, 00014 University of Helsinki, Finland (e-mail: helina.hartikainen@helsinki.fi)

Despite agreement that organic matter is an essential soil component, terminological confusion may result in inexact concepts of its role in controlling the chemical, physical and biological processes. Humus, which is synthesized primarily in humification process by microbes, is structurally very complex and resistant to degradation. It is produced from non-humus material: litter, a whole series of decomposition products, and identifiable constituents. Classifying soil organic matter into humus and non-humus materials permits the systematization of reactions involving organic matter. Microbial degradation of non-humus material releases plant nutrients and produces polysaccharides that stabilize soil aggregates, thus improving conditions for root growth. Antibiotics, vitamins and other active compounds affecting the biotic system can end up into soil as byproducts of the microbial metabolism. Only a very small portion of non-humus material is used as raw material for humus, whose importance is based on physico-chemical properties. Through its high water holding capacity, humus can physically control the mobility of compounds. Diverse functional groups participate in various types of chemical reactions (ion exchange, complex formation, dissolution, physical sorption of non-polar organic chemicals, etc). Similarly as in soil, humus acts as a buffer in water bodies. However, in contrast to soil, in waters photochemical reactions can enhance its degradation, thus leading to nutrient loadings and oxygen budget problems.

Key words: buffering, degradation, fulvic acids, humic acids,

Johdanto

Metsäntutkija Wilde kysyi vuonna 1971 *Soil Science –aikakauslehdessä*: ”Humus: mitä se on?” Hän vastasi kysymykseensä aluksi siteeraamalla kuuluisia runoilijoita kuten Goethea ja Shakespearea ja kuvaili humusta mm. maan hengeksi, komponentiksi, joka oli aikoinaan alkemisteille samanlainen mysteerio kuin viisastenkivi tai kääpiöt. Hän katsoi humuksen pysyneen arvoituksellisena huolimatta kaikesta käytettävissä olevasta hienosta analytiikasta. Sama aikakauslehti julkaisi 25 vuotta myöhemmin humus-ar-

tikkelien sarjan, jossa käsiteltiin mm. humushappojen muodostumista ja rakennetutkimusta sekä humushappojen kykyä sitoa vierasaineita. Kirjoituksista tuli hyvin esille, miten neljännesvuosisadan aikana tapahtuneen analyysiteknikoiden nopean kehittymisen myötä yksityiskohtainen tieto humuksen rakenteesta oli valtavasti lisääntynyt. Tiedon kertyminen on luonut pohjaa reaktiomekanismien ymmärtämiselle ja selkiyttäneet käsitystä humuksen roolista maan toiminnan ylläpitäjänä sekä tuonut lisävalaistusta sen merkityksestä ekosysteemitasolla.

Intuition tasolla humuksen merkityksestä on kuitenkin oltu selvillä jo kauan. Kun maanviljelyksen aloittaminen satoi ihmiset pysyville asuinsijoille, ensimmäisenä asutettiin jokilaaksot ja –tasangot. Niillä alueilla maa oli tummaa, mikä oli kokemuksen mukaan merkki hyvästä tuotokyvystä. Vaikka tumman värin huomattiin syntyvän kuolleista kasveista, nimeä tälle aineelle ei osattu antaa. Sitä arvostettiin elämän eliksiirinä, vaikka vaikutustavoista ei oltu selvillä. Itse asiassa humus-termi nykyisessä tarkoituksessa on varsin nuori. Ennen kuin se alkoi vakiintua tarkoittamaan vain tiettyä maan komponenttia, sitä käytettiin monenlaisissa merkityksissä (ks. Feller 1997). Roomalainen kirjailija Vergilius käytti sanoja humus, solum ja terra toistensa synonyymeinä merkityksessä maa. Plinius vanhempi kirjoitti kirjassaan ”Natural History”, että vehnä tarvitsee kasvaakseen kaksi jalkaa hyvää humusta.

Thaer kirjoitti v. 1809 oppikirjan ”Grundsätze der rationellen Landwirtschaft” (Järkiperäisen maanviljelyksen periaatteet), jossa hän ensimmäisenä käytti termiä humus tarkoittamaan vain maan tiettyä komponenttia (ref. Feller 1997). Hän selosti seikkaperäisesti ja paikkansa pitävästi tämän aineksen ominaisuuksia kuten koostumusta, reaktiivisuutta ja uuttuvuutta. Tämä kirja kuitenkin ruokki väärää hypoteesia, jonka mukaan kasvien kuiva-aineesta suurin osa, ellei kaikki, on peräisin maan eloperäisestä aineksesta. Thaerin aikainen Saussure oli kuitenkin jo osoittanut, että kasvien maasta ottaman aineksen osuus oli hyvin pieni verrattuna ilmakehästä peräisin olevaan ainekseen. Humusteoria käynnisti tieteellisen kädenväännön kasvien ravitsemuksesta. Se päättyi mineraaliteorian kannattajien voittoon.

Maan eloperäisen aineksen luokittelu

Nykyisin tiedämme, että maaperä on toiminnaltaan kemiallisista, fysikaalisista ja biologisista tekijöistä muodostuva reaktiojärjestelmä, jossa eri tekijöiden välillä vallitsee voimakas vuorovaikutussuhde. Orgaaninen aines on itse asiassa maahan varastoitunutta auringon energiaa, jolla on keskeinen rooli reaktioiden ohjailussa. Loogisen kokonaiskuvan muodostamista sen vaikutustavoista hämärtää kuitenkin usein terminologinen kirjavuus ja epätasaisuus. Ristiriitaisia mieli-

kuvia syntyy, kun kaikesta maan eloperäisestä aineksesta käytetään epätarkasti nimitystä humus. Nykyisissä oppikirjoissa (esim. Sposito 1989, Bohn et al. 2001) humukseksi määritellään kuitenkin vain humifioitumisprosessissa syntetisoitunut aines. Se on pääasiassa mikrobien tuottamaa ja niiden hajotusta vastaan kestävä, rakenteeltaan monimutkaista ja pitkäikäistä ainesta. Muuhun kuin varsinaiseen humukseen kuuluva aines on suhteellisen helposti hajoavaa kuollutta kariketta ja eri hajoamisasteilla olevaa materiaalia sekä selvästi tunnistettavia orgaanisia yhdisteitä kuten erilaisia happoja, valkuaisaineita, hiilihydraatteja jne.

Maan orgaanisen aineksen jako kahteen pääluokkaan, varsinaiseen humukseen ja suhteellisen helposti hajoavaan ainekseen (Schnitzer 1978), systematisoi maassa tapahtuvia prosesseja, sillä kummallakin on maan toimintojen kannalta omat tehtävänsä. Raja näiden kahden luokan välillä on kuitenkin liukuva, sillä kuolleen jäteaineen matka humukseksi on pitkä ja monivaiheinen. Sekä matkan varrella tapahtuvilla mineralisointireaktioilla ja niissä syntyvillä välituotteilla että humifioitumisprosessin lopputuotteella on maassa omat tärkeät tehtävänsä. Näin ollen orgaanisen aineksen eri luokkia ei voida käsitellä toisistaan riippumattomina.

Hajoavan orgaanisen aineksen merkitys

Hajoavalla orgaanisella aineksella on kaksi keskeistä tehtävää: se toimii kasvinravinnevarastona ja humussynteesin raaka-aineena. Hajotuksessa vapautuu ravinteita, hiilidioksidia ja epäorgaanisia suoloja, uuden kasvillisuuden käyttöön. Miten tehokkaasti ravinteita mineralisoituu, riippuu jäteaineen laadusta sekä ulkoisista olosuhteista. Maassa on suunnaton valikoima erityyppisiin yhdisteisiin erikoistuneita ja hyvinkin erilaisiin olosuhteisiin sopeutuneita hajottajamikrobeja. Tämän vuoksi kivennäismaahan joutuva jäteaine tavallisesti hajoaa suurimmaksi osaksi lähtöaineikseen (mineralisaatio). Vain erittäin pieni osa hajotettavasta materiaalista syntetisoituu humukseksi. Samantapaisen kasvillisuuden vallitessa pitkään samalla paikalla muodostuu maahan tulevan karikeaineen ja sen hajotuk-

sen välille melko vakaa tasapaino. Selvän poikkeuksen tästä tekevät luonnontilaiset suot, joissa hajotus on hidastunut, mikä pikkuhiljaa kasvat-
taa turvekerroksia. Turpeen maatumiseen liittyy aina mineralisaatio, jossa osa kasvaineuksesta muuttuu epäorgaanisiksi aineiksi. Maatuneisuudella tarkoitetaan tumman amorfisen massan l. humuksen osuutta.

Helposti hajoavan aineksen merkitys ei kuitenkaan rajoitu ravinteiden kierrätykseen. Mikrobiologinen aktiivisuus edistää kasvien kasvua myös muiden mekanismien kautta. Se parantaa ravinteiden hyväksikäyttöä mm. ylläpitämällä kivennäismaiden mururakennetta lima-aineiden tuotannon avulla. Lima-aineet ovat pitkiä taipuisia molekyylejä, jotka sitovat maapartikkeleita yhteen kestäviksi ja huokoisiksi muruiksi. Hyvä rakenne turvaa juurten kasvuedellytyksiä, mikä heijastuu versojen kasvuun. Hienojakoisilla mail-
la, joiden ongelmaksi helposti muodostuu liiallinen tiiviyys tai tiivistymisalttius, eloperäisen aineksen suotuisa vaikutus perustuu olennaisilta osin edellä kuvattuihin biologisiin tekijöihin. Hyväkuntoiselle maalle tyypillinen muheus säilyy kuitenkin vain sillä edellytyksellä, että maassa hajottajamikrobit pysyvät jatkuvasti työllistettyinä. Mikrobien metabolian sivutuotteina maahan joutuu myös monenlaisia aktiiviaineita kuten antibiootteja, vitamiineja ja aminohappoja, jotka vaikuttavat muiden maaeliöiden elämään. Joillakin eriteillä on gibberelliinin ja indolietikkahapon tapaisia ominaisuuksia ja niiden on havaittu edistävän kasvihormonien tavoin kasvua.

Humuksen muodostuminen

Biologista tietä tapahtuva humifioituminen on tärkeä prosessi kivennäismailla, mutta humussynteessin yksityiskohdista ei ole täyttä selvyyttä. Eibiologinen humifioituminen, jossa varsinainen humussynteesi tapahtuu ilman maaeliöstön myötävaikutusta, on hitaampaa. Sitä voi tapahtua esim. soissa, joissa anaerobiset olosuhteet, matala pH ja erilaiset haitalliset aineet heikentävät maaeliöstön toimintaa. Tällöin biologisen hajoituksen (esim. metaania tuottavien arkkien toiminta) tuloksena syntyneessä pienimolekyylisessä aineksessa on runsaasti orgaanisia radikaaleja, joiden reaktioiden seurauksena syntyy humusta.

Valtaosa maan orgaanisesta aineksesta kuuluu varsinaiseen humukseen, vaikka sen kertyminen on hidasta. Tämä selittyy sillä, että myös sen hajotus on hidasta. Kirjallisuudesta voi löytää tuhannen, jopa useamman tuhannen vuoden puoliintumisaikoja. Käytännön kokemuksesta tiedetään, että viljelymaassa humuspitoisuuden nostaminen on työn takana, vaikka hyvin hoidetussa maassa humus säilyykin miespolvelta toiselle. Huonon hajoavuuden vuoksi varsinainen humus ei voi itse toimia kasvien ravinteiden eikä mikrobien energian lähteenä maassa. Sen rooli maan prosessien ja elämän ylläpidossa perustuu monipuolisiin fysikaalisiin ja kemiallisiin vaikutustapoihin. Vesistöissä mikrobit voivat sen sijaan käyttää valokemiallisten reaktioiden pilkkomaa humusta energian lähteenään.

Humuksen fysikaalis-kemialliset vaikutustavat

Kivennäismaissa humus voi edistää viljavuuden säilymistä fysikaalisin mekanismein. Se pystyy sitomaan itseensä runsaasti vettä. Tämä ominaisuus vähentää maakerrosten läpi painuvan veden määrää. Samalla vähenee riski ravinteiden huuhtoutumisesta alaspäin vajoavan veden mukana. Tämä koskee etenkin sellaisia ravinteita, jotka eivät pysty kemiallisesti sitoutumaan maahan, kuten nitraattia. Sitomalla vettä itseensä humus myös varmentaa veden imeytymistä maahan. Tällöin veden kertyminen pellon pinnalle vähenee ja pintavirtailujen aiheuttama eroosioriski pienenee.

Jos tarkastellaan maaekosysteemin kemiallisen toimintakyvyn ylläpitoa, humus osoittautuu vertaansa vailla olevaksi reaktiokomponentiksi. Se tarjoaa reaktiopintaa, mutta toisaalta itse kilpailee muiden maassa esiintyvien aineiden kanssa sopivista reaktipaikoista. Puskurointi-, ioninvaihto-, kompleksinmuodostus-, liuotus- ja adsorptioreaktioilla ja muilla vastaavilla on huomattava merkitys aineiden liukenemisen ja sitoutumisen ja siten niiden liikkumisen ja biologisen käyttökelpoisuuden kannalta.

Monipuoliset reaktiomekanismit perustuvat humusmolekyyliden monimutkaisiin rakenneominaisuuksiin. Molekyylit ovat kooltaan suuria ja niissä voi esiintyä sekä hydrofiilisiä että hydro-

fobisia alueita. Keskeisessä roolissa ovat erityyppiset funktionaaliset ryhmät, joiden määrä ja laatu vaikuttaa mm. liukoisuus-, happo- ja kompleksinmuodostusominaisuuksiin. Perinteisessä humustutkimuksessa on erotettu kolme pääluokkaa: fulvohapot (FA), jotka liukenevat sekä happamiin että emäksisiin vesiliuoksiin; humushapot (HA), jotka liukenevat emäkseen, mutta saostuvat happamissa olosuhteissa (pH:ssa 2); sekä humiini, joka on liukenematonta sekä happamissa että emäksisissä olosuhteissa. Kaikilla näillä fraktioilla on omat tehtävänsä maan toimintojen kannalta.

Kasvien ravinnehuollossa tärkeä merkitys on humuksen kyvyllä sitoa tavallisia ravinnekatoneja kuten kalsiumia ja magnesiumia sähköisin vetovoimin ns. vaihtuvaan muotoon. Tällä tavoin pidättyneet ravinteet ovat jokseenkin turvassa huuhtoutumiselta, mutta silti kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Se, miten tehokkaasti tämä humuksen kationiensitomiskyky toimii, riippuu happamuudesta; mitä korkeampi on maan pH, sitä suuremmaksi kationenvaihtokyky nousee. Maata on siis syytä kalkita säännöllisin väliajoin, jotta tämä suotuisa ominaisuus saataisiin tehokkaasti hyödynnetyksi.

Toinen tärkeä mekanismi, joka säätelee metallien liikkumista ja biologista saatavuutta, on kompleksinmuodostus. Siinä metallikationi muodostaa lujan kemiallisen sidoksen humuksen funktionaalisten ryhmien kanssa. Jos sitoutuminen tapahtuu liukoiseen humukseen, myös syntävä kompleksi on liukoinen ja metalli liikkuu maaveden mukana. Tämä mekanismi voi helpottaa monien hivenravinteiden saantia, mikäli kompleksi kulkeutuu kasvin juurten lähelle ja purkautuu siellä. Toisaalta liukenemattomaan humukseen sitoutuminen heikentää tehokkaasti metallien liikkumista ja biologista käyttökelpoisuutta. Tämä mekanismi suojelee kasvia mm. haitallisilta raskasmetalleilta, esim. ilmakuormituksen maahan joutuneelta lyijyltä, mutta samalla se edistää lyijyn vähittäistä kertymistä pinta-maahan.

Humus pystyy myös kemiallisesti vaikuttamaan sellaisten anionien pidättymiseen ja liikkumiseen, joilla on voimakas taipumus sitoutua maassa olevien rauta- ja alumiinioksidien pinoille. Humuksen anionit kilpailevat samoista pidättymispinoista esimerkiksi fosfaatin kanssa, mikä

heikentää fosforin sitoutumismahdollisuuksia (esim. Hartikainen 1979, Hartikainen ja Yli-Halla 1996). Samalla kun kilpailun seurauksena fosforin sitoutuminen heikkenee, sen biologinen käyttökelpoisuus paranee. Humusyhdisteiden pyrkimys pidäytyä oksidipinoille selittää myös sen yleisen havainnon, että hienojakoisten maiden orgaanisen aineksen pitoisuus on tavallisesti korkeampi kuin karkeampien. Kun humusmolekyylit sitoutuvat hienojakoisen mineraaliaineksen pinnalle, ne tulevat entistä vaikeammin hajoviksi. Humiini-fraktion onkin arveltu olevan humushappojen tapaista ainetta, joka on voimakkaasti reagoanut maan epäorgaanisten komponenttien kanssa ja joka ei sen vuoksi uutu emäkseen eikä happoon (Bohn ym. 2001, s. 162).

Humus – puskuri muutospainetta vastaan

Maahan kohdistuva ympäristökuormitus ja monet maassa luontaisesti tapahtuvat reaktiot aiheuttavat muutoksia maan toiminnassa. Muun muassa happamoituminen muuttaa maan olosuhteita kasvien kasvun kannalta epäedulliseen suuntaan. Suomessa on hyvin vähän kalkkipitoisia maita, joissa karbonaatit toimivat tehokkaina puskuriaineina. Tätä puutetta korvaa osin maittemme korkea humuksen pitoisuus. Jos happamoituminen ei ole ehtinyt vielä pitkälle, humus pystyy sitomaan vetyioneja tiukasti itseensä vaihtumattomaan muotoon, jolloin ne eivät ole aktiivisia eivätkä pysty osallistumaan esim. liuotusreaktioihin. Koska sitoutuminen tapahtuu samoihin funktionaalsiin ryhmiin, joihin myös ravinnekationit sitoutuivat, puskuroinnin seurauksena kationinvaihtopaikat vähenevät ja kationien huuhtoutumisriski kasvaa.

Happamoitumisen edetessä pitemmälle humuksen tehtävät haittojen torjunnassa muuttuvat. Pitkälle happamoituneissa maissa kasvien ja mikrobin kannalta suurimmaksi ongelmaksi muodostuu se, että joitakin metalleja, esim. alumiinia ja mangaania, alkaa esiintyä liukoisessa muodossa haitallisen korkeina pitoisuuksina. Humus lieventää näiden metallien myrkyvaikutusta sitomalla ne kompleksiyhdisteiksi. Liukenemattomaan muotoon sidottuina niistä ei ole haittaa, ja myös liukoisina kelaatteina esiintyessään metal-

lit ovat selvästi vähemmän toksisia kuin epäorgaanisessa muodossa.

Humus vaikuttaa myös monilla muilla tavoin ympäristön tilaan ja ekosysteemien toimivuuteen. Se säätelee kationi- ja anionimuotoisten orgaanisten kemikaalien käyttäytymistä maassa samojen periaatteiden mukaan, jotka toimivat epäorgaanisten ionien kohdalla. Sen sijaan poolittomien yhdisteiden pidättäjänä maassa tulee kysymykseen vain humus, jonka hydrofobisille pinnoille nämä kemikaalit pystyvät pidättämään fysikaalisin voimin. Esimerkiksi ympäristömyrkyinä tunnetut polyaromaattiset hiilivedyt ja klooratut bentseeniyhdisteet pystyvät sitoutumaan tällä tavalla maa-ainekseen.

Humus toimii samojen periaatteiden mukaan sekä maaperässä että vesistöissä. On kuitenkin huomattava, että humus on stabiilia nimenomaan syntyolosuhteissaan. Kun maaperän humusta joutuu vesistöihin, sen hajoamisolosuhteet muuttuvat radikaalisti. Esimerkiksi korkeaenerginen UV(B)-valo pystyy pilkkomaan suuria molekyylejä. Fotokemiallisen hajotuksen on todettu olevan varsin merkittävää (Vähätalo 2000). Pilkkoutuneet molekyylit eivät ole enää mikrobeille samanlainen hajotusongelma kuin suuret ja monimutkaiset molekyylit. Tämä saattaa vaikuttaa vesien tilaan edistämällä ravinteiden vapautumista humuksesta ja ennen pitkää myös perustuotantoon.

Yhteenveto

Edellä esitetyn perusteella humus on monipuolisesti toimiva ja tärkeä maaperän ainesosa. Se toimii maan ihona ja ylläpitää elämää sekä syntyynsä liittyvien reaktiovaiheiden että omien monipuoli-

listen ominaisuuksiensa kautta. Kivennäismailla sen roolin voi kiteyttää määritelmään, että se voimistaa maan fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten tekijöiden välisiä vuorovaikutussuhteita ja puskuroi maata erilaisia muutospaineita vastaan. Vesistöissä humus toimii samanlaisena puskurina kuin maaperässäkin. Toisaalta voidaan sanoa, että vesistöissä korkea humuspitoisuus voi muodostua rasitukseksi niiden happitaloudelle. Siksi vesistöihin joutuvan humuskuormituksen vähentäminen on tärkeä osa vesiensuojelua ja sillä voidaan estää vesiluonnon haitallista muuttumista.

Kirjallisuus

- Feller, C. 1997. The concept of soil humus in the past three centuries. Teoksessa: Dan H. Yaalon ja S. Berkowicz (eds.): History of soil science – International perspectives. *Advances in GeoEcology* 29: 15-46.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., & O'Connor, G. A. 2001. Soil chemistry. John Wiley & Sons, Inc. New York. 307 p.
- Hartikainen, H. 1979. Phosphorus and its reactions in terrestrial soils. *Journal of Scientific Agricultural Society of Finland* 51: 537-624.
- Hartikainen H. & Yli-Halla, M. 1996. Solubility of soil phosphorus as influenced by urea. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159: 327-332.
- Schnitzer, M. 1978. Humic substances: Chemistry and reactions. In: Schnitzer, M. & Khan S. U. (eds.): Soil organic matter. Chapter 1: 1-64. *Developments in Soil Science* 8. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 319 p.
- Sposito, G. 1989. The chemistry of soils. Oxford University Press. New York. 277 p.
- Vähätalo, A. 2000. Role of photochemical reactions in the biogeochemical cycling of detrital carbon in aquatic environments. ISBN 951-45-9141-0 (PDF version available at <http://ethesis.helsinki.fi>).
- Wilde, S. A. 1971. Forest humus: Its classification on a genetic basis. *Soil Science* 111: 1- 12.