

Aino Smolander

Typpilannoitus metsämaan viljavuuden parantajana – kestävyysnäkökohtia maan ja ympäristön kannalta

Smolander A. (2018). Typpilannoitus metsämaan viljavuuden parantajana – kestävyysnäkökohtia maan ja ympäristön kannalta. Metsätieteen aikakauskirja 2018-10080. Tieteen tori. 8 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10080>

Yhteystiedot Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Helsinki

Sähköposti aino.smolander@luke.fi

Hyväksytty 27.11.2018

Lähtökohta – kangasmetsämme ovat typpirajoitteisia

Typeä on kangasmetsiemme maassa runsaasti, tuhansia kiloja hehtaarilla. Valtaosa siitä on sitoutuneena tiukasti erilaisiin kompleksisiin orgaanisiin, etenkin proteiinityyppeihin yhdisteisiin, joiden molekyylit ovat liian isoja mikrobien tai kasvien otettavaksi ja hajoavat hyvin hitaasti. Metsäpuille käyttökelpoisia typpimuotoja on epäorgaanisen typpi eli ammonium- ja nitraattityppi sekä nykytiedon mukaan hyvin merkittävänä myös pienimolekyyliset orgaaniset typpi yhdisteet eli aminohapot ja pienet peptidit. Vain pieni osa, useimmiten alle pari prosenttia, metsämaan tpeestä on tällaisessa muodossa. Typpi onkin ravinne, joka rajoittaa eniten kangasmetsiemme kasvua ja sen takia typpilannoitus usein parantaa puuston kasvua.

Metsiä lannoitettiin 1960-luvulta 1980-luvun loppupuolelle yhteensä 3,2 miljoonaa hehtaaria, josta noin puolet oli kangasmetsiä ja puolet turvemaiden metsiä. On arvioitu, että kangasmetsisämme on lannoituksella saatu yhteensä 16 miljoonaa kuutiometriä lisää puuta. Suurimmillaan kasvunlisäys oli 1970-luvun loppuvuosina, jolloin lannoitukset lisäsivät metsiemme kasvua noin miljoonalla kuutiometrillä vuosittain. Todennäköisesti valtaosa tästä kasvunlisäyksestä on typpilannoituksen ansiota. Viime vuosina kiinnostus typpilannoitukseen on herännyt uudelleen, koska se tuottaa kasvuvasteen nopeasti ja varttuneiden metsien lannoitushyöty voidaan realisoida nopeasti. Yleisesti ottaen tavoitteena on toimiva tapa lisätä puuston kasvua ja hiilen sidontaa niin, että ympäristöhaitat kuten huuhtoutuminen, kaasumaiset päästöt ja monimuotoisuuden kärsiminen ovat mahdollisimman pieniä.

Tässä kirjoituksessa tarkastelen nykytietämystä typpilannoituksen kestävyysnäkökohdista metsämaan ja ympäristön kannalta. Rajoitan tarkastelun kangasmetsiin. Typpilannoituksen maa- ja ympäristövaikutuksia arvioitaessa on hyvä tiedostaa orgaanisen typen kompleksinen rakenne ja typen kierron mutkikkuus. Metsämaan pieneliöt vastaavat karikkeen isokokoisten orgaanisten typpi yhdisteiden hajoamisesta molekyylikooltaan pieniksi orgaanisiksi yhdisteiksi ja lopulta mine-

ralisaatioissa ammoniumtypeksi ($\text{NH}_4\text{-N}$), jota nitrifikaatioissa voidaan muuttaa lopulta nitraattitypeksi ($\text{NO}_3\text{-N}$), jota taas denitrifikaatioissa muutetaan kaasumaiseen muotoon, dityppioksidiksi (N_2O) tai molekulaariseksi typeksi (N_2) asti. Ilmakehän molekulaarista typeä taas eräät bakteerit sitovat ammoniumtypeksi biologisessa typen sidonnassa. Nämä typen kierron toiminnot ja niiden väliset vuorovaikutukset ovat avainasemassa typpilannoituksen erilaisten vaikutuksien kannalta. Samoin vaikutuksia tarkasteltaessa on tärkeää ymmärtää, että metsäpuiden ravinteiden saannin kannalta olennaista ei ole käyttökelpoisten ravinteiden pitoisuus maassa vaan niiden jatkuva saatavuus maan ravinnevuosta. Teoreettisesti ajatellen päästöt ympäristöön minimoituvat ja puiden kasvu on suurinta ravinneljän ollessa kullakin hetkellä yhtä suuri kuin ravinteiden otto. Ruotsalaiset tutkimukset puoltavat tätä näkemystä, mutta käytännön toiminnan ja talouden asettamat rajoitteet tietenkin sulkevat pois usein toistuvan lannoituksen.

Nopea- ja hidasliukoiset typpilannoitteet

Typpilannoitelaji vaikuttaa sen kohtaloon maassa ja ympäristössä. Etenkin lannoitteen liukoisuus on avainasemassa vaikuttaen lannoituksen kestoon ja ympäristövaikutuksiin. Nopealiukoisten metsänlannoitteiden typen muoto on vaihdellut viimeisten vuosikymmenten aikana olleen ammoniumsulfaattia ($\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, ureaa ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) ja ammoniumnitraattia (NH_4NO_3). Lannoitteen hidasliukoisuus antaa sille useita etuja nopealiukoiseen verrattuna. Typen hetkellisestä korkeasta pitoisuudesta maanesteessä ei ole hyötyä puustolle, vaan typen jatkuva saanti pienistäkin pitoisuuksista kasvukauden aikana on oleellista. Lisäksi typen vapautuessa lannoitteesta hitaasti puusto ottaa sen varmimmin käyttöönsä eikä se ole niin altis ympäristöä kuormittaviin typpihäviöihin. Hidasliukoinen lannoite parantaa metsän typpitilannetta pitkäaikaisesti eikä aiheuta mahdollista shokkivaikutusta maan eliöille.

Ureaformaldehydi on urean ja formaldehydin polymeeri, jonka ketjupituus ja siten liukoisuus voi vaihdella aina hyvinkin hitaasti liukenevaan asti. Silloisen Kemiran rahoittamat, 1980–1990-lukujen taitteessa tehdyt tutkimukset osoittivat amerikkalaisen ureaformaldehydipolymeerin (tuotenimi Nitroform) olevan monessa suhteessa parempi kuin vertailukohteena olleet urea tai ammoniumnitraatti, mutta typpilannoituksen rajusti vähetessä metsässämme kiinnostus siihen hiipui.

Jonkin verran on saatavissa myös metsäkäyttöön erikoislannoitteita, joskin niiden hinta muodostunee liian korkeaksi laajamittaiseen käyttöön. Havainnot siitä, että pienimolekyylinen orgaaninen typpi on merkittävä typen lähde metsäpuillemme, ovat johtaneet tutkimus- ja kehitystyöhön näiden lannoitteiden osalta. Ruotsissa kehitetty arginiini-nimiseen aminohappoon perustuva lannoite (ArGrow) näyttää parantavan metsäpuiden taimien juuristoa ja on käytössä jo joillakin taimitarhoilla esim. Pohjoismaissa. Sen mahdollisuuksista kasvatusmetsiköissä ei ole kuitenkaan vielä juuri tietoa ja korkean hinnan takia laajempi käyttö lienee epärealistista.

Kierrätystalouden periaatteen mukaisesti ravinteet pitää saada talteen ja käyttää uudelleen, mutta typen suhteen se on ongelmallista. Energiapuun poltossa syntyvä tuhka sisältää muita ravinteita, mutta typpi on palanut pois ja puun tuhkassa ei juuri ole typeä. Typen talteenoton yhdyskuntajätteistä tai karjan lannasta ja laajamittaisen, taloudellisesti kannattavan käytön metsänlannoitteena estää näiden jätteiden sisältämät runsaat vesimäärät ja logistiikkaongelmat pitkin kuljetusmatkoineen. Lisäksi metsiemme virkistyskäytön aiheuttamat metsähygieeniset vaatimukset ovat nekin näiden jätteiden metsäkäyttöä vastaan.

Typen kertyminen metsämaahan ja lannoitetypen kohtalo

Metsien typpilannoitusta on tutkittu valtaosin käyttäen nopealiukoisia typpilannoitteita. Puusto ottaa heti vain pienen osan annetusta nopealiukoisesta typpilisästä, typen isotoopeilla tehdyissä kokeissa osuudet ovat useasti olleet alle 10 %:a lisätystä tpeestä. Osa typpilannoituksesta päätyy aluskasvillisuuteen tai maamikrobeihin tai sitoutuu kemiallisesti maaprofiliin, etenkin humuskerrokseen. Osa voi huuhtoutua. Pitemmällä tähtäyksellä metsäekosysteemiin jäänyt typpi kuitenkin vapautuu kiertoön ja puustonkin käyttöön hajotustoiminnan tuloksena. Mikrobibiomassassa on yleensä 4–9 %:a humuskerroksen tpeestä. Etenkin metsämaassa, jonka hiili/typpisuhde on korkea ja käytettävissä on vähän helposti käyttökelpoista tpepeä ympäröivässä maassa, mikrobit ottavat ja sitovat itseensä merkittävän osan typpilisästä. Sienijuurta muodostavia mykorritsasieniä ja niiden rihmastoja pidetään typen ottamisen lisäksi merkittävinä typen pidättäjinä metsämaassa, uusimpien tietojen valossa jopa typpirajoitteisuuden aiheuttajina varttuneissa metsissä, koska laajat rihmastot eivät luovuta isäntäpuulleensa tpepeä ennen kuin niiden oma typentarve on tyydytetty. Pitkäaikaisen toistuvan typpilannoituksen on usein todettu lisäävän typen nettomineralisaatiota eli mineraalityypen vapautumista orgaanisesta aineesta maahan ja vähentävän typen sitoutumista mykorritsasiiniin ja muuhun mikrobibiomassaan.

Typpilannoitus lisää hiilen sitoutumista metsämaahan. Ensinnäkin biomassan tuotos ja karikesato lisääntyvät, joten orgaanista ainetta tulee maahan enemmän. Lisäksi sekä Suomen että Ruotsin kenttäkokeissa on typpilannoituksen havaittu hidastavan orgaanisen aineen hiilen mineralisaatiota eli vaikutus hiilen hajoamiseen on päinvastainen kuin typen mineralisaatioon. Syitä voi olla useampia. Typpilannoituksen vaikutuksesta erityisesti ligniinin hajotus heikkenee, koska typpilannoitus estää sitä hajottavien entsyymien toimintaa. Pitkäaikainen typpilannoitus muuttaa mikrobiyhteisön rakennetta, koska typpipulan sijasta mikrobeille syntyykin puute helposti käyttökelpoisesta hiilestä ja mikrobibiomassa kaiken kaikkiaan pienenee. Typpilannoituksen on todettu useissa tutkimuksissa vähentävän erityisesti ektomykorritsasiienten biomassaa. Tämä johtunee hiilen allokaation muuttumisesta maanalaista enemmän maanpäälliseen. Toisaalta typpilisän vaikutus ei ole välttämättä suoraviivainen, sillä typen saatavuuden vähäisen lisäämisen on joskus todettu kiihdyttävän hiilen mineralisaatiota. Typpilannoituksen vaikutusta muiden ravinteiden kuin typen mineralisoitumiseen orgaanisesta aineesta ei tunneta hyvin.

Karikesadon suurenemisen lisäksi karikkeeseen hiili ja jo maassa oleva hiili siis hajoaa yleensä hitaammin typpilannoituksen jälkeen ja vaikutus on pitkäkestoinen. On arvioitu, että lannoituksen aiheuttama hiilen sitoutumisen määrä on kymmenkertainen verrattuna lannoituksen aiheuttamiin hiiliemissioihin lannoitteiden valmistuksen, kuljettamisen tai levityksen kautta. Yhden kilogramman typpilisän on arvioitu lisäävän hiilen kertymistä maahan suuruusluokaltaan 10 kilogrammaa hiiltä, eli typpiannos 100 kg/ha lisäisi hiiltä 1000 kg/ha vastaten noin 2000 kg/ha orgaanisen aineen lisää. Tässä mielessä on perusteltua väittää, että lannoittamalla metsiämme typellä lisäämme niiden hiilen sitomiskykyä myös maaperään ja typpilannoitusta onkin esitetty tehokkaaksi ja nopeaksi keinoksi hiilen sitomisessa metsiin nopealla aikataululla.

Valtaosa elollisen luonnon tpeestä on tullut alun perin biologisen typensidonnan kautta eli tapahtumassa, jossa eräät bakteerit pelkistävät ilmakehän vapaata tpepeä (N_2) muille pieneliöille ja kasveille sopivaan muotoon, ammoniumtypeksi (NH_4). Tpepeä tulee metsiimme biologisen typen sidonnan kautta etenkin lepän juurinysträsymbioosin ja sammalissa elävien syanobakteerien avulla. Lepikon typen sidonta voi olla vuositason suuruusluokkaa 60–150 kg/ha, ja sammalten luokkaa 0,5 kg/ha, enimmilläänkin 3 kg/ha/v. Typpilisä vähentää yleensä biologista typensidontaa. Typpilisän negatiivinen vaikutus pätee leppä-*Frankia*-symbioosissa periaatteessa sekä juurinyströiden muodostumisen että niiden typensidonnan suhteen, mutta haitallisen vaikutuksen aiheuttavasta lannoitetypen määrästä ei ole tietoa. Erityisen herkkä lisätypelle on syanobakteerin typensidonta sammalissa – jo alle 1 kg/ha/v tpepeä on osoitettu vähentävän typen sidontaa.

Typen häviöt kasvavassa metsässä

Typpilannoituksen aiheuttama merkittävä huoli ympäristön kannalta on typen huuhtoutumisriskin lisääntyminen ja huuhtoutumisen edistämä pintavesien rehevöityminen ja pohjaveden pilaantuminen. Typpilannoitteiden epäorgaanisista typpiyhdisteistä nitraattityppi on paljon herkemmin huuhtoutuva kuin ammoniumtyppi, joka sitoutuu maahan lujasti. Lannoitetypen suoran huuhtoutumisen lisäksi typpilannoitus voi lisätä maan oman typen huuhtoutumista.

Edellä todettiin, että typpilannoitus lisää yleensä typen mineralisaatiota eli ammoniumtypen vapautumista orgaanisesta aineesta. Nitrifikaatio, jossa pieneliöt, tietyt bakteerit tai arkit, muuttavat ammoniumtyypeä lopulta nitraattitypeksi, on avainasemassa typpeen liittyvissä ympäristöhäviöissä nitraatin huuhtoutumisalttiuden takia. Lisäksi nitrifikaatio on alkusyy typen kaasumaisiin häviöihin kahdella tavalla. Nitraatti on lähtöaine denitrifikaatiossa, jossa tietyt mikrobit pelkistävät sen voimakkaaksi kasvihuonekaasuksi eli dityppioksidiksi (N_2O), joka voidaan edelleen pelkistää ilmakehän kannalta harmittomaksi molekulaariseksi typeksi (N_2). Happamissa olosuhteissa suurempi osa pysähtyy N_2O :ksi kun taas vähemmän happamassa maassa se vielä muutetaan N_2 :ksi. Lisäksi dityppioksidia voi syntyä nitrifikaation sivutuotteenakin.

Nettonitrifikaatio on yleensä olematonta metsämaissamme, mutta joissakin oloissa se voi kiihtyä merkittäväksi. Typpirajoitteisessa metsässä ammoniumtyppi rajoittaa nitrifikaatiota, joten periaatteessa typen lisääminen voi kiihdyttää sitä, oli typen alkuperä sitten joko suoraan lannoitteesta tai kiihtyneestä typen mineralisaatiosta. Etenkin 1980- ja 1990-luvulla tehdyt tutkimukset osoittivat, että nitrifikaatio onkin vilkastunut sekä turkistarhoja lähellä olevissa metsissä että osassa typpilannoitetuista metsistä. Samat tutkimukset osoittivat kuitenkin, että nitrifikaation alkamisen edellytys joissakin typpilannoitetuissa maissa oli kalkitus. Tämä johtuu siitä, että pääsääntöisesti nitrifikaatio vähenee maan happamuuden mukana, vaikka happamuutta sietäviä nitrifikaatiota on todettu joissakin maissa. Kalkitusta tutkittiin samoina vuosikymmeninä metsämaan happamuuden lievittäjänä, mutta tutkimustulokset sekä puuston kasvun osalta että em. nitrifikaatoriskin takia eivät olleet lupaavia.

Yhdistetty puun tuhka-typpilannoitus, jossa typen lisäksi olisi turvattu muidenkin ravinteiden saatavuus, vähentää sekin maan happamuutta. Suomalaiset tutkimustulokset eivät kuitenkaan viittaa ainakaan pitkäaikaiseen riskiin nitraattitypen muodostuksen suhteen, sillä pitkäaikaisissa tuhka-typpilannoituskokeissa kuusikoissa ja männiköissä ei yhdessäkään havaittu nitrifikaatiota humuskerroksessa 15–30 vuotta lannoituksen jälkeen tehdyissä tutkimuksissa, vaikka maan pH ja typen mineralisaationopeus olivat edelleen korkeampia. Yhdenmukaisesti näiden maatulosten kanssa puuston kasvuvaikeus säilyi huomattavasti pitempään kuin pelkällä typpilannoituksella. Näiden tapaustutkimusten tulokset yhdistetyn tuhka- ja typpilannoituksen suhteen olivat siten hyvin lupaavia ainakin pitkäaikaisten vaikutusten osalta.

Nopealiukoisten typpilannoitteiden typpimuoto ja maan toiminnot vaikuttavat siihen, miten lannoitus vaikuttaa maan happamuuteen. Typpilannoituksen hetkellinen vaikutus metsämaan happamuuteen riippuu lannoittelajista. Urean hydrolyysissä vapautuu ammoniakkia, joka reagoi-dessaan maan vetyionien kanssa kohottaa humuskerroksen pH:ta muutamia vuosia. Teoreettisesti tarkasteltuna typpilannoitus voi pitemmällä tähtäyksellä happamoittaa maata esim. sen mahdollisesti kiihdyttämän nitrifikaation takia. Ennako-oletusten vastaisesti pitkäaikaistutkimukset osoittavat, ettei metsämaa ole juurikaan happamoitunut toistuvien typpilannoitusten vaikutuksesta. Typpilannoituksen on ajateltu lisäävän riskiä alumiinipitoisuuksien nousuun toksiseksi asti. Yhdenmukaisesti vähäisten happamuusmuutosten kanssa tätä ei kuitenkaan näytä tapahtuvan.

Teoreettisesti ajatellen typen huuhtoutumisen pitäisi olla vähäistä typpirajoitteisessa kangas-metsässä, koska kasvien ja mikrobin typen tarve ylittää typen saatavuuden. Yhdenmukaisesti tämän oletuksen kanssa typpipitoisuudet maavedessä ovat olleet pieniä lannoittamattomissa metsissä

pienen typpilaskeuman alueilla. Samoin epäorgaanisen typen pitoisuudet virtaavissa vesissä ovat olleet pieniä. Lisäksi analysoitaessa typpilaskeuman ja typen huuhtoutumisen riippuvuutta, pienen laskeuman alueella ei havaittu mitään suhdetta laskeumatypen määrän ja typen huuhtoutumisen välillä.

Pitkäaikaisen toistuvan typpilannoituksen jälkeen on havaittu kohonneita nitraattitypen pitoisuuksia orgaanisen kerroksen alta kerätyssä maavedessä. Koska typen saatavuus rajoittaa kuitenkin voimakkaasti metsiemme kasvua ja lisätty typpi voi sitoutua tiukasti, suhteellisen pieni typpilannoitus, 150 kg/ha 10 vuoden välein aiheutti vain väliaikaisen ja pienen piikin vajoveden nitraattitypen määrissä. Yleistäen sekä ruotsalaisia että suomalaisia tutkimustuloksia voidaan todeta, että pitkäaikainen toistuva typpilannoitus voi lisätä typen määrää ja muuttaa typen muotoja ja dynamiikkaa orgaanisesta kerroksesta valuvassa maavedessä, mutta syvemmillä kivennäismaassa lannoituksen aiheuttamat muutokset näyttävät lieviltä eli huolimatta typpilannoituksesta typen pitoisuudet maavedessä ovat pieniä ja johtavat luultavasti hyvin pieniin typpihäviöihin. Riski typen huuhtoutumiselle lannoitetussa metsämaassa näyttää riippuvan enemmän yksittäisen lannoitusannoksen suuruudesta kuin vuosien saatossa kertyneestä lisätypen määrästä. Siis kerralla annetut, isommat lannoitusmäärät lisäävät typen huuhtoutumista enemmän kuin pienemmät määrät usein annettuna. Ruotsalaistutkimuksessa arvioitiin, että noin 3% lisäystä tyypestä huuhtoutuu syvemmälle maahan tavallisilla kaupallisilla typpilannoitustasoilla. Nitrifikaationkaan voimistuminen typpilannoituksen seurauksena ei välttämättä johda nitraattitypen huuhtoutumiseen, sillä mikrobit tai kasvit voivat ottaa muodostuneen nitraatin. Siitä huolimatta voimakas nitrifikaatio lisää riskiä typen huuhtoutumiselle, joka voi realisoitua esim. rankkasateiden aikana tai aikana, jolloin kasvipeitteen typen otto on vähäistä.

Kasvavan metsän merkitykseen typen ottajana ja typpihäviöiden estäjänä viittaa se, että Yhdysvaltojen koillisosassa tehdyssä vertailututkimuksessa vanhasta metsästä huuhtoutui tyypeä enemmän kuin kasvavasta nuoresta metsästä.

Lannoittamattomassa kasvavassa metsässä suurin osa tyypestä huuhtoutuu orgaanisessa muodossa. Vajoveden orgaaninen typpi koostuu syvemmillä maassa valtaosin pienimolekyylisestä ja vaikeasti hajotettavasta tyypestä. Typpilannoituksen vaikutuksesta typen huuhtoutumiseen orgaanisessa muodossa on vähän tietoa ja tulokset eivät ole kaikilta osin yhteneväisiä, mutta orgaanisen typen osuus näyttää kuitenkin pienenevän suhteessa epäorgaaniseen tyypeen.

Kangasmetsien merkitys Suomen N_2O -päästöissä on huomattavasti pienempi kuin maatalousmaiden tai soiden. Toistuvakaan typpilannoitus kangasmetsässä ei näytä aiheuttavan tasoltaan niin suuria N_2O -päästöjä kuin em. maan käyttömuodot, mutta tutkimuksen vähyyden vuoksi yleistämisessä on oltava varovainen. Laboratoriokokeet osoittivat metsämaitemme vähäisen nitrifikaation selittävän N_2O :n muodostumisen vähäisyyttä. Maan happamuus eli alhainen pH lisää kuitenkin typen päästöissä nimenomaan dityppioksidin osuutta verrattuna ilmakehän molekulaariseen tyypeen (eli N_2O/N_2 -suhdetta). Siis pääasiallinen tuote happamissa maissa on N_2O eikä harmiton molekulaarinen typpi. Tämänkin takia kohteita, joissa typpilannoitus saattaa edistää nitrifikaatiota, pitäisi välttää.

Typpilannoitetun metsän päätehakkuu

Lannoitustypen osuus metsämaan typpivarastosta on pieni tavallisilla typpilannoitusmäärillä. Silti typpihäviöiden tarkastelu typpilannoitetun metsän päätehakkuun jälkeen on perusteltua, mutta tähän paneutuvia tutkimuksia on vähän. Kaiken kaikkiaan pelkkä avohakkuu vilkastuttaa metsämaan mikrobitoimintaa ja ravinteiden mineralisaatiota vapauttaen ravinteita orgaanisesta aineesta aluskasvillisuuden ja tulevan puusukupolven käyttöön. Samalla se kuitenkin aluksi lisää

riskiä typen häviöille metsäekosysteemistä, koska puuston ja kasvillisuuden typen otto lakkaa tai vähenee väliaikaisesti ja samaan aikaan hakkuualalla on runsaasti uutta hajotettavaa kasvimateriaalia. Typen liikkeelle lähtöä edistävät mikrobitoiminnot kuten nitrifikaatio voivat saada jalansijaa maan happamuuden ja eräiden typen mobilisaatiota hidastavien, havupuille tyypillisten orgaanisten yhdisteryhmien vähetessä. Lisäksi typpeä tehokkaasti ottavien ja pidättävien mykorritsasienien määrä vähenee ja epäorgaanisen typen huuhtoutumismäärän onkin osoitettu korreloivan negatiivisesti sekä ektomykorritsasienien kasvun että sieni/bakteerisuhteen kanssa. Silti erityisesti ennen aluskasvillisuuden kehittymistä ja uuden puusukupolven kasvua mikrobibiomassa on tärkeä typen pidättäjä hakkuualan pintamaassa. Avohakkuilla huuhtoutuu typpeä etenkin 3–5 vuotta hakkuun jälkeen, mutta tutkimusten mukaan vajoveden typpipitoisuudet saattavat olla lievästi kohonneita paljon pitempäänkin. Epäorgaanisen typen lisäksi avohakkuu voi lisätä myös orgaanisen typen määrää vajovedessä, vaikka sen suhteellinen osuus kokonaistypestä onkin pienempi kuin kasvavassa metsässä.

Tutkimustulokset siitä lisääkö typpilannoitus typen saatavuutta seuraavalle puusukupolvelle, eli hyödyttääkö lannoituksen aikaansaama suurempi typpivarasto uutta päätehakkuulle syntynttä puustoa, eivät ole yhteneväisiä. Samoin typpilannoituksen vaikutus päätehakkuun jälkeisiin typpi-häviöihin ansaitsee lisätutkimuksia. Yleisesti ottaen aiemman typpilannoituksen lisävaikutus typen huuhtoutumiseen näyttää ilmenevän etenkin kohteissa, joissa huuhtoutuminen ei ole luonnostaan voimakasta, ja typpilannoitusmäärät ovat olleet poikkeuksellisen isoja. Kerimäellä tehdyssä tapaus-tutkimuksessa hakattiin 30 vuotta toistuvasti noin viiden vuoden välein typpilannoitettu kuusikko käenkaalimustikkatypin kasvupaikalla. Tällöin havaittiin, ettei aiempi toistuva typpilannoitus (yht. 860 kg/ha typpeä) sanottavasti vaikuttanut kivennäismaan vajoveden typpeen ja avohakkuun voimakas nitraattitypen huuhtoutumista lisäävä vaikutus peitti alleen typpilannoituksen vaikutuksen. Vastaavasti ruotsalaisessa tutkimuksessa tarvittiin suuria lannoitetyppimääriä (yht. yli 1000 kg/ha typpeä) ennen kuin typpilannoitus lisäsi huuhtoutumista avohakkuun jälkeen ja tällöin typpi huuhtoutui pääasiassa nitraattitypen muodossa. Tällöinkin tämä ylimääräinen lannoituksen aiheuttama huuhtoutumishäviö oli vain pieni osa maan lisääntyneestä typpivarannosta. Edellä mainituissa tutkimuksissa viimeinen lannoitus oli tehty 5–10 vuotta ennen päätehakkuuta.

Typen huuhtoutuminen avohakkuun jälkeen riippuu myös maankäsittelymenetelmästä. Tällöinkin kriittinen kohta on ajanjakso avohakkuun ja maanmuokkauksen jälkeen ennen aluskasvillisuuden ja uuden puusukupolven kehitystä. Ruotsalaisessa tutkimuksessa voimakas maan käsittely lisäsi uudistusvaiheen typen huuhtoutumista etenkin aiemmin typpilannoitetuilla käsittelyillä. Kerimäellä tehdyssä tapaus-tutkimuksessa mätästys näytti lisäävän typen määriä mättäiden alla kivennäismaan vajovedessä, mutta aiemman typpilannoituksen vaikutus ei ollut nähtävissä. Samassakin metsikössä maan typpivarasto ja typen kierto poikkeavat suuresti eri kohdissa ja muuten typpirajoitteisessa maassa saattaa muodostua paikallisia “hotspotteja” esim. maan käsittelyn tai hakkuutähteen levittäytymisen vaikutuksesta. Nykyinen korjuuteknologia jättää hakkuutähteet kasoihin, joiden alla ravinteiden kierto on vilkasta. Avohakkuulla typen liikkeelle lähtöä vauhdittavat mikrobitoiminnot kiihtyvät näiden kasojen alla ja tutkimuksin on osoitettu sekä voimakasta nitrifikaatiota maassa että nitraattitypen kohonneita pitoisuuksia vajovedessä.

Typpiyhdisteiden joutuminen vesistöihin asti heijastaa typen ylijäämää, joka ei ole sitoutunut metsän kasveihin tai muihin eliöihin ja joka ei ole pidättynyt maahan. Yleisesti ottaen typen virtauksen puroihin ja jokiin on todettu olevan keskimäärin suuruusluokkaa 1–2 kg/ha vuodessa, josta valtaosa on orgaanisessa muodossa. Sitä kulkeutuuko typpilannoituksen oma typpi ja/tai maassa lannoituksen vaikutuksesta lisääntynyt typpi pintavesiin tai jopa Itämereen asti on tutkittu vähän. Lannoituskohteen valinta ja lannoituksen määrä ovat epäilemättä ratkaisevassa asemassa typen kulkeutumisessa vesistöihin. Ruotsalaisessa tutkimuksessa arvioitiin, että typpilannoitus kohtuullisilla lannoiteannoksilla ei lisää typpimääriä typen valunnassa vesistöihin, mutta määrät

saattavat kohota suurten lannoituspinta-alojen ja ison valunnan ollessa kyseessä. Levittämällä kohtuullinen määrä typpirajoitteiseen metsikköön riittävän monta vuotta ennen päätehakkuuta ja välttämällä jyrkkiä rinteitä, avohakkuualojen, rantojen ja vesistöjen läheisyyttä tämä riski jää todennäköisesti pieneksi.

Periaatteessa nitrifikaation alkaminen tai kiihtyminen voi edesauttaa typen kaasumaisten päästöjen muodostusta. Kerimäen tapaustutkimuksessa dityppioksidin päästöt päätehakkuun jälkeen olivat suuremmat kuin vertailumetsikössä, mutta aiempi pitkäaikainen typpilannoitus ei vaikuttanut N_2O -päästöihin. Lisäksi avohakkuulla suurin osa denitrifikaatiosta johti N_2 :een asti toisin kuin vertailumetsikössä, jossa N_2O oli lopputuote.

Metsämaan mikrobiyhteisön monimuotoisuus ja typpilannoituksesta palautuminen

Typpilannoitus vaikuttaa metsämaan mikrobeihin muuttaen sekä mikrobiyhteisön rakennetta että sen toimintaa. Useat muutokset johtunevat siitä, että typpilannoitus aiheuttaa maamikrobeille pulan helposti käytettävästä hiilestä. Edellä kuvatun mukaisesti lannoitus voi muuttaa sieni/bakteerisuhdetta bakteerien hyväksi vaikuttaen vähentävästi erityisesti ektomykorritsasieniin ja joissakin maissa lisäävästi typen kierron avainlajeihin eli nitrifikaatiobakteereihin.

Ruotsalaisten tutkimusten perusteella näyttää kuitenkin siltä, että maa palautuu ennalleen typpilannoituksen jälkeen. Lannoitettu maa ei eronnut merkittävästi lannoittamattomasta 10–20 vuotta lannoituksen jälkeen monipuolisesti tutkittujen mikrobitoimintojen eikä yhteisörakenteen suhteen. Tutkimuksissa osoitettiin myös ektomykorritsasienten toipuminen typpilannoituksesta tässä ajassa.

Mahdollisuuksia typpilannoituksen korvaamiseen?

Metsissämme kasvaa luontaisena harmaaleppä ja tervaleppä, jotka elävät juurinysträsymbioosissa ilmakehän typpeä ammoniumtypeksi sitovan *Frankia*-bakteerin kanssa. Maataloudessa jo muinaiset suomalaiset hyödynsivät tätä biologista typensidontaa kaskiviljelyssä – ehkäpä tietämättään. Kaskeamisen ja viljankasvatuksen jälkeen harmaaleppä pioneeripuuna valtasi alueen, joka voitiin jälleen 10–20 vuoden kuluttua kasketa takaisin viljanviljelyyn uudestaan viljavana. Lepän maata parantavan vaikutuksen osoittivat useat esim. akateemikko A.I. Virtasen ja Prof. Peitsa Mikolan tutkimukset 1950- ja 1960-luvuilla. Lepän ja *Frankian* symbioosi kartuttaa merkittävästi metsämaan typpivaroja. Pelkästään lepikon vuotuinen lehtikarikesato tuo 60–100 kg/ha typpeä maahan ja maa säilyy ravinteikkaana pitkään lepikon hakkaamisen jälkeen. Typpi vapautuu vähitellen lepän karikkeen hajotessa eikä aiheuta näin yhtäkkiä typpilisää maahan. Prof. Mikola totesi, että lepikkoon tai lepikon jälkeen perustettu viljelykuusikko kasvaa koko kiertoajan hyvin ja lepällä on myös edullinen vaikutus männyn kasvuun kangasmaalla. Mikola suosittelikin tutkimustulostensa perusteella leppäsekoituksen hyväksymistä havupuutaimikoissa ainakin niin kauan, kunnes se kilpailullaan ja varjostuksellaan alkaa haitata pääpuulajin kasvua. Kuusi ja leppä pärjäävät samoilla kasvupaikoilla, typensidonnaltaan tehokkaita *Frankia*-bakteereja on osoitettu olevan yleisesti metsämaissamme ja leppäkin tulee itsestään, eli edellytykset ovat olemassa ainakin maan parantamiselle kuusikkoja ajatellen. Kysymys on, että löytyykö metsänhoidollisia keinoja nykyistä enemmän suosia tai sietää leppää ja parantaa näin maan viljavuutta pitkäaikaisesti siten, että ei haitata arvokkaampien puulajien kasvua.

Johtopäätökset

Vaikka typpilannoituksen vaikutuksia on tutkittu paljon, useimmat tutkimukset ovat luonteeltaan tapauskohtaisia, joten tutkimustulosten yleistäminen on ongelmallista. Typpilannoituksella on epäilemättä mahdollista lisätä metsikön biomassan tuotosta ja maan hiilivarastoa. Sillä voidaan välillisesti vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta, vaikka energiaa tarvitaan lannoitteen valmistamisessa. Kovin intensiivinen metsien lannoitus pitää sisällään ympäristöriskejä. Lannoitelajin lisäksi lannoituksen intensiteetti, lannoituskohteiden valinta ja pinta-ala ja lannoitus aika ovat ratkaisevia tekijöitä ympäristöriskeiden välttämiseksi. Esimerkiksi lannoittamisen ajankohta on erityisen tärkeä nopealiukoisilla lannoitteilla. Hidasliukoisilla lannoitteilla se ei ole niin tärkeä pienemmän huuhtoutumisriskin takia.

Tutkimusta ja kehitystoimintaa tarvitaan erityisesti riittävän hidasliukoisten metsän typpi-lannoitteiden saamiseksi markkinoille nopealiukoisten sijasta, koska monet ympäristöön liittyvät riskit pienevät oleellisesti käytettäessä hidasliukoisia lannoitteita. Kestävyyssnäkökohtien lisäksi hidasliukoisten lannoitteiden käyttöä puoltaa se, että ne tarjoavat puustolle pitkäaikaisen typen lähteen hetkellisesti kohonneiden maan pitoisuuksien sijasta vastaten näin puiden ravinteiden oton pääperiaatteita. 1980–1990-lukujen taitteen monipuoliset ja pitkäaikaiset tieteelliset tutkimukset osoittivat hidasliukoisen, urean ja formaldehydin pitkäketjuisen polymeerin (Nitroform) lupaavaksi metsän lannoitteeksi monessa suhteessa, mutta lannoitustoiminnan vähetessä kiinnostui hiipui. Lisäksi lannoitustarpeen tyydyttäminen biologisin keinoin lepän typensidontasymbioosin avulla ansaitsee myös pohtimista. Eräs ajankohtainen kysymys liittyy hakkuutähteen korjuuseen ja sen kestävytyteen: korvatako hakkuutähteen mukana metsiköstä vietyä typpeä.

On osoitettu, että typpilannoitettu metsä palautuu ennalleen eli typpirajoitteiseksi suhteellisen nopeasti eli näyttää siltä, ettei palautumattomia muutoksia tapahdu kohtuullisen typpilannoituksen seurauksena. Kaiken kaikkiaan tutkimustulosten valossa voi yhtyä Ruotsin maatalousyliopiston Prof. Peter Högbergin sanoihin: ”typpirajoitteiset Fennoskandian metsät ovat melko resilienttejä kohtuullisille typpilisäyksille”.

Kirjallisuutta

- Binkley D., Högberg P. (2016). Tamm review: revisiting the influence of nitrogen deposition on Swedish forests. *Forest Ecology and Management* 368: 222–239. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.035>.
- Hedwall P.-O., Gong P., Ingerslev M., Bergh J. (2014). Fertilization in northern forests – biological, economic and environmental constraints and possibilities. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(4): 301–311. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.926096>.
- Högberg P., Näsholm T., Franklin O., Högberg M. (2017). Tamm review: on the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian forests. *Forest Ecology and Management* 403: 161–185. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.045>.
- Saarsalmi A., Mälkönen E. (2001). Forest fertilization research in Finland: A literature review. 2001. *Scandinavian Journal of Forest research* 16(6): 514–416. <https://doi.org/10.1080/02827580152699358>.
- Sponseller R.A., Gundale M., Fitter M., Ring E., Nordin A., Näsholm T., Laudon H. (2016). Nitrogen dynamics in managed boreal forests: recent advances and future research directions. *Ambio* 45(S2): 175–187. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0755-4>.
- Smolander A., Kukkola M., Helmisaari H.-S., Mäkipää R., Mälkönen E. (2000). Functioning of forest ecosystems under nitrogen loading. Teoksessa: Mälkönen E. (toim.). *Forest condition in a changing environment – the Finnish case. Forestry Sciences, Vol. 65. Kluwer Academic Publishers. s. 229–247.*