

Fanni Valkama

GLYFOSAATTI MAAPERÄSSÄ JA SEN BIOHAJOAMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Marja Palmroth
Johanna Rinta-Kanto
Tammikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Fanni Valkama : Glyfosaatti maaperässä ja sen biohajoaminen (Glyphosate in soil and its biodegradation)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tammikuu 2020

Glyfosaatti on organofosfonaatti, jota käytetään rikkakasvien torjunta-aineena. Glyfosaattipohjaisia torjunta-aineita on sekä nestemäisinä että kiinteinä aineina, ja niitä käytetään levittämällä aine torjuttavien kasvien juurille tai lehdistölle. Glyfosaatti imeytyy kasviin ja aiheuttaa kasvin kuoleman estämällä aromaattisten aminohappojen tuottamisen. Aromaattiset aminohapot ovat välttämättömiä kasvin kasvun kannalta.

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin, mitä torjunta-aineena käytettävälle glyfosaatille tapahtuu maaperässä kasviin imeytymisen lisäksi. Selvitettiin, mitkä tekijät vaikuttavat glyfosaatin sorptioon maaperään, kuinka paljon sorptiota tapahtuu ja voiko glyfosaatti kulkeutua pintamaasta muualle ympäristöön. Työssä tutkittiin myös glyfosaatin biohajoamista: miten ja minkälaiset mikrobit pystyvät hajottamaan glyfosaattia. Hajotustoimintaan vaikuttavia tekijöitä kartoitettiin ja pohdittiin, miten glyfosaatin biohajoamista voitaisiin tehostaa.

Tärkeimmiksi glyfosaatin sorptioon vaikuttaviksi kemiallisiksi tekijöiksi nousivat maaperän kationit, pH sekä fosfaatit. Etenkin kolmenarvoiset kationit (alumiini ja rauta) lisäävät glyfosaatin sorptiota maaperään. Glyfosaattia sitoutuu enemmän hieman happamaan maaperään kuin neutraaliin tai emäksiseen. Fosfaatti kilpailee osittain glyfosaatin kanssa samoista sitoutumispaikoista ja pystyy joissain tilanteissa syrjäyttämään maaperään sitoutuneen glyfosaatin, joten korkea fosfaattien määrä vähentää glyfosaatin sorptiota maahan.

Fysikaalisista tekijöistä muun muassa maapartikkelien koolla, sadannalla ja lämpötilalla on vaikutusta siihen, mitä glyfosaatille tapahtuu maaperässä. Glyfosaatin sorptio on selvästi voimakkaampaa hienojakoisempaan, saviseen maaperään kuin soraiseen maahan, jossa maahiukkaset ovat suurempia ja sitoutumispaikkoja on vähemmän. Runsaat sateet etenkin pian glyfosaatin käytön jälkeen voivat huuhtoa glyfosaattia syvemmälle maahan tai vesistöihin. Alhainen lämpötila hidastaa glyfosaatin hajoamista, mikä voi aiheuttaa sen kertymistä maaperään.

Tärkeimmät glyfosaattia hajottavat mikrobit ovat bakteereita, joita on löydetty esimerkiksi maaperästä, glyfosaatilla kontaminoituneesta maaperästä sekä jätteenkäsittelylaitoksen aktiivilietteestä. Mikrobit voivat käyttää glyfosaattia hiilen, fosforin ja typen lähteenä. Mikrobeilla on kaksi vaihtoehtoista reittiä glyfosaatin hajottamiseksi ja niiden primääriset hajoamistuotteet ovat aminometyylifosfonihappo eli AMPA ja sarkosiini. Reitti, jolla syntyy AMPA:a, vaikuttaisi olevan yleisempi.

Biohajoamisen merkitykseen vaikuttaa se, mitä mikrobeja maaperässä on ja kuinka paljon, maaperässä vallitsevat olosuhteet sekä glyfosaatin saatavuus. Esimerkiksi hapen vähäinen määrä tiiviissä, kyntämättömässä maassa ja pakkasen vähentävät monien mikrobien hajotustoimintaa. Jos glyfosaatin sorptiotaso maaperään on korkea, on glyfosaatti huonommin saatavilla mikrobeille, ja biohajoamista tapahtuu vähemmän.

Avainsanat: glyfosaatti, torjunta-aine, sorptio, maaperä, biohajoaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. GLYFOSAATTI TORJUNTA-AINEENA.....	2
3. GLYFOSAATTI MAAPERÄSSÄ.....	5
3.1 Sitoutuminen maaperään	5
3.2 Kulkeutuminen ja huuhtoutuminen	9
4. MIKROBIT GLYFOSAATIN HAJOTTAJINA	11
4.1 Hajottaminen käytännössä	11
4.2 Hajotustoimintaan vaikuttavat tekijät	15
4.3 Mikrobit glyfosaatilla pilaantuneen maaperän kunnostajina	17
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	19
LÄHTEET	21

1. JOHDANTO

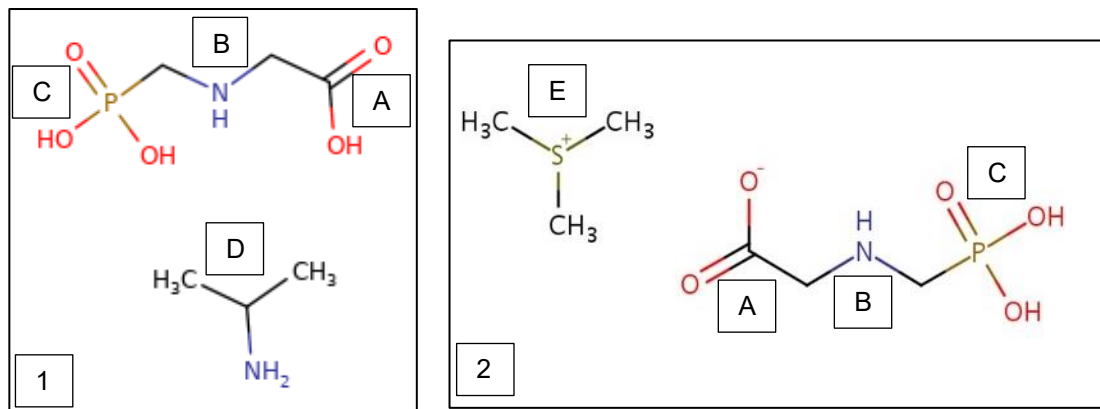
Glyfosaatti eli N-(fosfonimetyyli)glysiini on laajasti maailmalla käytetty rikkakasvien torjunta-aine. Suomessa kaikista vuonna 2006 ostetuista torjunta-aineista 48 % oli glyfosaattipohjaisia [6]. Torjunta-aineita käytetään esimerkiksi pelloilla rikkakasvien tappamiseksi ja niiden kasvun estämiseksi, jotta ne eivät haittaisi varsinaisia viljelykasveja [14]. Rikkakasvien aiheuttamia haittoja ovat esimerkiksi elintilan vieminen viljelykasveilta sekä veden ja maaperän ravinteiden kuluttaminen. Glyfosaatin suosiota selittävät muun muassa edullinen hinta muihin rikkakasvien torjunta-aineisiin verrattuna ja suhteellisen alhainen ekotoksisuus sekä monien transgeenisten viljelykasvien resistenttiys glyfosaatille. Glyfosaatin toiminta perustuu aromaattisten aminohappojen synteesin estämiseen [8].

Työssä keskitytään glyfosaatin käyttäytymiseen maaperässä ja sen biohajoamiseen. Tarkoituksena on selvittää, millä tekijöillä on vaikutusta glyfosaatin sorptioon ja huuhtoutumiseen, ja mitä haittavaikutuksia glyfosaatti voi aiheuttaa maaperässä. Lisäksi työssä kartoitetaan mikrobien hajotustoimintaa: miten hajottaminen toimii, mitkä tekijät siihen vaikuttavat ja mitkä mikrobit pystyvät hajottamaan glyfosaattia. Työssä pohditaan myös, miten biohajoamista voitaisiin tehostaa.

Työn toisessa luvussa kerrotaan lyhyesti glyfosaatin käytöstä, toimintamekanismista sekä ominaisuuksista. Kolmannessa luvussa käsitellään glyfosaattia maaperässä eli mitä glyfosaatille voi tapahtua kasveihin imeytymisen lisäksi. Luvussa kerrotaan, mitkä tekijät vähentävät ja mitkä lisäävät glyfosaatin sorptiota maaperään ja voiko glyfosaatti kulkeutua merkittävästi kauemmas käyttöpaikastaan. Neljäs luku käsittelee glyfosaatin biohajoamista. Luvussa esitellään eri hajoamismekanismit, mikrobien toimintaan vaikuttavia tekijöitä sekä toimia, joilla glyfosaatin biohajoamiseen voitaisiin vaikuttaa. Viimeisessä luvussa tehdään johtopäätökset työssä kerrottujen asioiden pohjalta.

2. GLYFOSAATTI TORJUNTA-AINEENA

Glyfosaatti on hiilestä ja fosforista koostuva organofosfonaatti, jonka kemiallinen kaava on $C_3H_8NO_5P$. Glyfosaatti sisältää kolme funktionaalista ryhmää: karboksyyli-, amino- ja fosfonaattiryhmän (kuva 1) [8]. Glyfosaatissa esiintyvän fosforin ja hiilen välinen sidos on hyvin stabiili [4]. Huoneenlämmössä (20 Celsius-astetta) glyfosaatti on kiinteää, kiteistä ainetta. Glyfosaattipohjaisten torjunta-aineiden myynti aloitettiin 1974 [6,7]. Glyfosaattia myydään esimerkiksi kauppanimillä Roundup, Rodeo ja Ground Bio. Glyfosaatti itsessään on happo, mutta tavallisesti rikkakasvien torjunnassa sitä käytetään suolamuodossa isopropyyliamiini- [3] tai trimetyylisulfoniumsuolana [7] (kuva 1). Glyfosaatti torjuu rikkakasveja tehokkaammin suolamuotoisena kuin happona, minkä uskotaan johtuvan suolamuodon paremmasta imeytymisestä kasviin [11]. Glyfosaattia käytetään maataloudessa, kotitalouksissa ja esimerkiksi puistoissa ja tienvarsilla [9]. Glyfosaatilla voidaan torjua sekä yksivuotisia että monivuotisia kasveja, ja sen toiminta on epäselektiivistä [11].



Kuva 1. Glyfosaatti-isopropyyliamiinisuola (1, vasemmalla) ja glyfosaatti-trimetyylisulfoniumsuola (2, oikealla). A = karboksyyli-ryhmä, B = aminoryhmä, C = fosfonaattiryhmä, D = isopropyyliamiini, E = trimetyylisulfonium

Glyfosaattipohjaisia torjunta-aineita on sekä nestemäisinä että kiinteinä aineina [11]. Nestemäinen torjunta-aine voidaan levittää esimerkiksi pellolle ruiskuttamalla, kiinteässä muodossa oleva taas levitetään maahan lähelle torjuttavia kasveja. Käyttötavan lisäksi käytettävän torjunta-aineen vahvuus sekä käyttötiheys vaihtelevat viljelyrutiinien mukaan [14]. Maaperästä glyfosaatti absorboituu torjunta-aineelle altistetun kasvin lehdistöön ja kulkeutuu nilakerroksen kautta muualle kasviin [6]. Vaikutus ilmenee lehtien

kellastumisena ja putoamisena. Lehdet putoavat yleensä 5–10 päivän kuluttua torjunta-aineen käytöstä, mutta joskus aikaa saattaa kulua jopa kuukausi. [2]

Glyfosaatin rikkakasveja torjuva vaikutus perustuu sen toimimiseen kompetitiivisena inhibiittorina. Kompetitiivinen inhibiittori on molekyyli, joka voi sitoutua entsyymiin aktiiviseen kohtaan ja viedä näin paikan substraatilta. Jos substraatti ei pääse kiinnittymään entsyymiin, ei myöskään katalysoitua reaktiota tapahdu. Glyfosaatti kiinnittyy 5-enolipyruvyylishikimaatti-3-fosfaattisyntaasiin eli EPSPS:iin ja vie näin paikan fosfoenolipyruvaatilta, jolloin entsyymi ei pysty toimimaan [1,3]. EPSPS on sikimaattireitin toiminnan kannalta välttämätön entsyymi, jota löytyy kasvisolun plastidista ja jonkin verran myös sytoplasmastasta [11]. Sikimaattireitillä tuotetaan aromaattisia aminohappoja fenyylialaniinia, tyrosiinia ja tryptofaania, jotka ovat tärkeitä kasvin kasvamisen kannalta [1,3]. Näiden aminohappojen puute aiheuttaa lopulta kasvin kuoleman. Myös joidenkin sekundääristen metaboliittien, kuten ligniinin ja flavonoidien, tuottaminen estyy [13].

Glyfosaatti aiheuttaa kasveissa myös esimerkiksi fotosynteesin vähenemistä ja klorofyllin hajoamista. Glyfosaatin ei kuitenkaan tiedetä vaikuttavan muihin entsyymeihin kuin EPSPS:iin, joten näiden edellä mainittujen vaikutusten epäillään johtuvan joko sikimaattireitin toimimattomuudesta tai takaisinkytkentäreaktiosta. [11]

Sikimaattireitti löytyy kasvien lisäksi monista mikro-organismeista, kuten joistain bakteereista ja hiivoista. Maaperään joutunut glyfosaatti vaikuttaa haitallisesti myös näihin eliöihin, joilla on tärkeä rooli maaperän muokkauksessa. Mikrobit ovat vastuussa muun muassa ravinteiden kierrätyksestä ja orgaanisen aineksen hajottamisesta. Näiden toimintojen häiriintymisellä on luultavasti laskeva vaikutus maan hedelmällisyyteen ja sadon tuottamiseen. [1] Glyfosaatin käyttö siis muokkaa kasvillisuuden lisäksi myös maaperän mikrobikantaa [14].

Glyfosaatin puoliintumisaika maaperässä vaihtelee suuresti: lyhyimmillään glyfosaatin puoliintuminen vie vain muutaman päivän, pisimmillään taas useita kuukausia tai jopa vuosia [6,7]. Puoliintumisajan vaihtelut johtuvat eroista maaperän tyypissä ja ilmastossa. Esimerkiksi karkeassa, soraisessa maaperässä glyfosaatin hajoaminen on nopeampaa kuin multaisessa maaperässä, jossa glyfosaatin sitoutumisaste on korkeampi. Maaperään sitoutuneen glyfosaatin puoliintumisaika on tutkimuksissa ollut 222-835 päivää, kun vapaana maassa olevan glyfosaatin puoliintuminen kesti vain 6-9 päivää [10]. Lämpötila ja kosteus vaikuttavat maaperässä olevien mikrobien aktiivisuuteen, ja mikrobit puolestaan vaikuttavat glyfosaatin biohajoamiseen [6]. Puoliintumisajan on mitattu olevan pidempi kylmillä alueilla kuin lämpimillä, sillä kylmillä alueilla maaperä jäätyy talvella pitkiksi ajoiksi [9].

Glyfosaatin tärkein hajoamistuote on aminometyylifosfonihappo eli AMPA [8]. AMPA on erittäin vesiliukoista ja sen hajoaminen maaperässä on usein hitaampaa kuin glyfosaatin. AMPAn puoliintumisajan on mitattu vaihtelevan 39 ja 300.7 päivän välillä (keskiarvo 120.4 päivää). AMPAn sitoutuminen maaperään on monilta osin samankaltaista kuin glyfosaatin ja myös se voi kulkeutua sadeveden mukana syvemmälle maaperään tai vesistöihin. [9] AMPA vaikuttaisi olevan vähemmän tai saman verran ekotoksista kuin glyfosaatti [8].

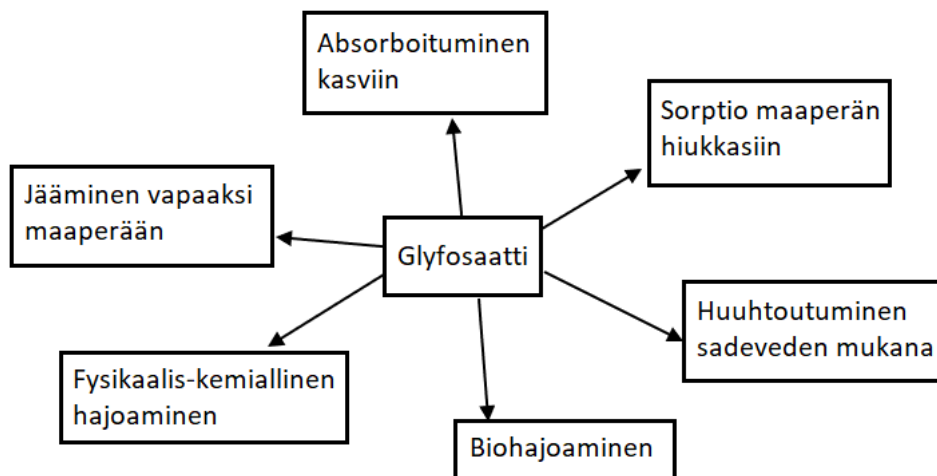
Vaikka glyfosaatin LD50-arvo on pienempi kuin ruokasuolan ja sitä pidetään turvallisena torjunta-aineena, tiedetään sen aiheuttavan joitakin haittoja ympäristölle. Glyfosaatin todettiin olevan myrkyllistä sammakkoeläimille, sillä lähes kaikki nuijapäät ja nuoret sammakot kuolivat altistuessaan sille. Asiaa tutkittiin lisäämällä glyfosaattia suoraan lampeen, jossa sammakot elivät. Nämä tutkimukset ovat kuitenkin kritisoituja, sillä tutkimuksissa käytettiin epätavallisen suuria altistuspitoisuuksia verrattuna glyfosaatin tavallisiin käyttöpitoisuuksiin. [8] Glyfosaatilla on vaikutusta myös hyönteisiin, kuten ampiaisiin, hyönteisiin ja erilaisiin kuoriaisiin. Esimerkiksi ampiaisia koskevassa tutkimuksessa glyfosaatin huomattiin vaikuttavan ampiaisten lentämiseen, ruokahaluun sekä ruoan etsimiseen. [14] Glyfosaatin tärkein hajoamistuote, AMPA, aiheuttaa haittaa sekä kasveissa että eläimissä DNA:n korjausprosessille ja mRNA:n synteetille [13].

3. GLYFOSAATTI MAAPERÄSSÄ

Glyfosaattia päätyy maaperään, kun sitä käytetään torjunta-aineena. Kasvien toleranssi glyfosaatille vaihtelee, mikä vaikuttaa käytettävän torjunta-aineen määrään ja konsentraatioon. Torjunnassa käytettävän aineen annostus vaikuttaa puolestaan maaperään päätyvän glyfosaatin määrään. [11]

3.1 Sitoutuminen maaperään

Kaikki maaperään levitetty glyfosaatti ei päädy sen varsinaiseen käyttötarkoitukseen eli torjumaan rikkakasveja. Kasveihin absorboitumisen lisäksi glyfosaatti voi esimerkiksi jäädä vapaaksi maaperään tai huuhtoutua sadeveden mukana (kuva 3). [8] Siihen, mitä glyfosaatille tapahtuu, vaikuttavat monet asiat, kuten ilmasto ja maassa oleva kasvillisuus.



Kuva 3. Maaperään levitetyn glyfosaatin käyttäytyminen.

Maaperään levitetty glyfosaatti voi sitoutua maaperän hiukkasiin eli tapahtua sorptiota. Sorptio tarkoittaa aineen fysikaalista ja kemiallista kiinnittymistä toiseen aineeseen. Sorption tyyppejä ovat adsorptio, absorptio ja ioninvaihto. Adsorptiossa aine kiinnittyy toisen aineen pinnalle, kun taas absorptiossa aine imeytyy toisen aineen sisälle. Ioninvaihdossa aine vaihtaa ioneja eli anioneja tai kationeja toisen aineen ionien kanssa.

Laboratoriotutkimuksessa, jossa selvitettiin glyfosaatin käyttäytymistä maaperässä, jopa 80 % glyfosaatista adsorboitui maa-ainekseen ja vain 20 % jäi liukoiseen muotoon. Kenttätutkimuksessa maa-ainekseen adsorboituneen glyfosaatin osuus oli vielä

suurempi; 88,8 %. Liukoiseksi jäi siis vain 11,2 % glyfosaatista. Molemmissa olosuhteissa mittaus tehtiin 72 h glyfosaatin käytön jälkeen. [2] Toisessa laboratoriotutkimuksessa, jossa tutkittiin glyfosaatin absorptiota, maahiukkasiin adsorboitui 84 % glyfosaatista eli liukoiseen muotoon jäi 16 % käytetystä määrästä. Tässä tutkimuksessa mittaus tehtiin 24 h glyfosaatin käytön jälkeen. [4]

Yleisesti ottaen aineet, jotka sitoutuvat voimakkaasti maahan, eivät huuhtoudu tai kulkeudu kovin helposti syvemmälle maaperään tai vesistöihin [7]. Glyfosaatin arvot Freundlichin kiinteä–neste -jakautumiskertoimelle sekä orgaaninen hiili – vesi - jakautumiskertoimelle ovat suhteellisen korkeat (taulukko 1), minkä perusteella glyfosaatin voidaan olettaa sitoutuvan voimakkaasti maaperään [9]. Freundlichin jakautumiskerros mittaa kemiallisen aineen konsentraatioiden suhdetta maaperän ja veden välillä. Orgaaninen hiili – vesi -jakautumiskerros kertoo, kuinka suuri osa kemiallisesta aineesta on sitoutuneena maaperän orgaaniseen ainekseen ja kuinka suuri osa liuenneena maan veteen. Jakautumiskertoimien arvot kuitenkin vaihtelevat olosuhteiden, kuten maaperän tyyppin mukaan.

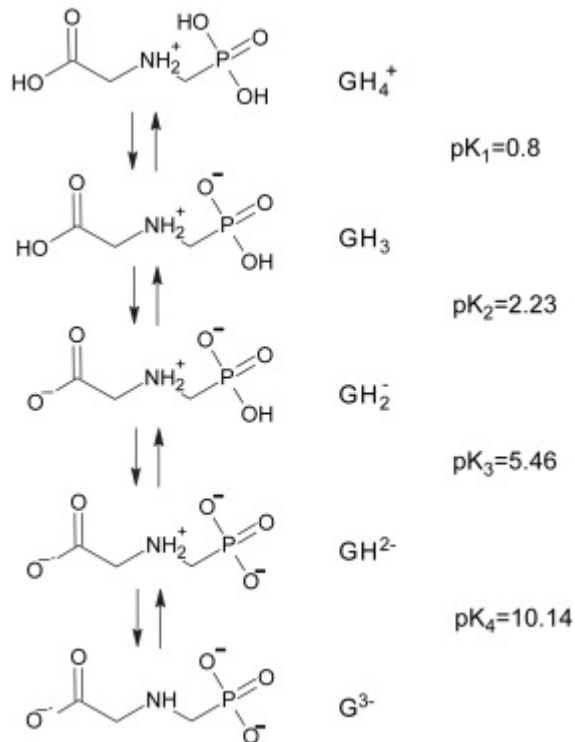
Taulukko 1. Glyfosaatin ominaisuuksia, [9] mukaan. Oktanoli-vesi -jakautumiskerros kertoo aineen liukenemisestä veden ja orgaanisen liuottimen, oktanolin, välillä. Arvo ilmoitetaan logaritmiarvona, sillä sen suuruus vaihtelee paljon eri aineiden välillä.

Höyrynpaine	$1.31 \times 10^{-5} \text{ Pa (25 } ^\circ\text{C)}$
Tiheys	1.74 g/cm^3
Vesiliukoisuus	Runsasliukoinen
Oktanoli–vesi -jakautumiskerros ($\log K_{ow}$)	<-3.2
Freundlichin kiinteä–neste - jakautumiskerros (K_F)	9.4 mL/g - 897 mL/g (keskiarvo 258.8 mL/g)
Orgaaninen hiili – vesi - jakautumiskerros (K_{FOC})	884 mL/g - 60 000 mL/g (keskiarvo 15 344 mL/g)

Glyfosaatin sitoutuminen maaperän hiukkasiin riippuu maaperän tyyppistä ja vaihtelee todella paljon eri maatyypin välillä. Sorptiokapasiteettia kuvaava jakautumiskerros K_d vaihtelee glyfosaatilla välillä 8–410 l/kg maaperän ominaisuuksien mukaan [4]. Jakautumiskerros kertoo, missä suhteessa kemiallinen aine on liuenut veteen ja sitoutunut maaperään. Sorptioon vaikuttavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi maahiukkasten koko, orgaanisen aineksen määrä, maaperän happamuus ja

maaperässä olevien ioneiden laatu ja määrä. Glyfosaatti sitoutuukin maahan lähinnä muodostamalla sidoksia maaperässä oleviin mineraaleihin, alumiinihydroksidiin, raudan oksideihin tai orgaaniseen ainekseen [4]. Yleisesti ottaen hienojakoisemmassa maaperässä sorptiota tapahtuu enemmän kuin karkeammassa, sillä hienojakoisilla maahiukkasilla on enemmän pinta-alaa, johon glyfosaatti voi sitoutua.

Glyfosaatti on polaarinen molekyyli ja polyproottinen happo. Maaperän pH-arvo vaihtelee yleensä välillä 4-8, ja tällä pH-alueella glyfosaatti esiintyy mono- tai divalenttisenä anionina (kuva 3). Protonit irtoavat karboksyyli ryhmästä ekvivalenttipisteessä 2,23 ja fosfonaattiryhmästä ekvivalenttipisteessä 5,46. Anionimuodossa oleva glyfosaatti voi muodostaa sidoksia maaperän kationeihin, etenkin kolmenarvoisiin kationeihin [8]. Kationeista rauta ja alumiini, jotka ovat kolmenarvoisia kationeja, voimistavatkin glyfosaatin sitoutumista maaperään voimakkaimmin. Myös kahdenarvoiset kationit, kuten sinkin, magnesiumin ja kuparin kationit, lisäävät glyfosaatin sorptiota maahan. Erot kationinvaihtokapasiteeteissa selittävätkin, miksi glyfosaatin sitoutuminen vaihtelee niin paljon eri maaperätyyppien välillä. Kationinvaihtokapasiteetti tarkoittaa maaperän kykyä vaihtaa kationeja. Maaperässä sitoutuneena ollut kationi, esimerkiksi maahiukkasiin adsorboitunut magnesium, irtoaa, ja sen tilalle sitoutuu toinen kationi, kuten alumiini. Maaperässä, jossa on suuri kationinvaihtokapasiteetti, tapahtuu paljon kationinvaihtoa, jolloin glyfosaatti voi muodostaa komplekseja vapaana oleviin kationeihin [7]. Savinen maaperä sisältää yleensä enemmän näitä kationeja kuin hiekkainen maaperä, ja savisella maalla onkin suurempi kapasiteetti glyfosaatin sorptioon kuin hiekkaisemmalla maalla. [4,7]



Kuva 3. Glyfosaatin protolysoituminen pH:n vaikutuksesta. [12]

Glyfosaatin sorptio maaperään on samankaltaista kuin fosfaatin; molemmat esimerkiksi sitoutuvat maaperään, jossa on alumiini- tai rautahydroksidia [8]. Glyfosaatti ja fosfaatti kilpailevatkin ainakin osittain samoista sitoutumispaikoista [6,7,8]. Fosfaatin sitoutuminen vaikuttaa kuitenkin olevan vahvempaa kuin glyfosaatin, koska monet sitoutumispaikat ovat suotuisampia fosfaatille kuin glyfosaatille. Siksi helposti liukenevassa muodossa olevaa glyfosaattia on enemmän maaperässä, jossa on paljon fosfaattia [4,7]. Esimerkiksi götiittiin, joka on rautahydroksimineraali, fosfaatin sorptio on vahvempaa kuin glyfosaatin ja se pystyy myös syrjäyttämään jo sitoutuneen glyfosaatin. Kilpailua ei kuitenkaan tapahdu kaikissa maaperätyypeissä, vaan joissain sitoutumispaikat ovat spesifejä joko fosfaatille tai glyfosaatille. [8]

Glyfosaatin sorptio maaperään riippuu myös pH:sta [7,8]. Sitoutuminen on kääntäen verrannollinen pH:n arvoon eli pH-arvon noustessa maaperään sitoutuneen glyfosaatin määrä vähenee. Samoin käy muille fosfonaateille ja fosfaateille: pH:n noustessa maaperän varaus muuttuu negatiivisemmaksi ja anioneille sopivat sitoutumispaikat vähenevät [8]. Maaperän pH-arvo on ollut useissa tutkimuksissa tärkein yksittäinen glyfosaatin sitoutumiseen vaikuttava tekijä [7,8].

Maaperän orgaanisen aineksen vaikutus glyfosaatin sorptioon on epäselvä [7,8]. Glyfosaatin oktanoli-vesi-jakautumiskertoimen logaritminen arvo on negatiivinen ($\log K_{ow} = -3.2$ [9], $-3,4$ [12]), joten orgaanisen aineksen ei sen perusteella uskoisi sitovan

glyfosaattia [12]. Joidenkin tutkimusten mukaan orgaanisen aineksen määrä on suoraan verrannollinen glyfosaatin sitoutumisasteeseen, kun taas joidenkin mukaan orgaaninen aines inhiboi glyfosaatin sitoutumista [7]. Sorptio saattaa tässäkin toimia samoin kuin fosforin, jonka sitoutumiseen orgaaninen aines vaikuttaa kahdella tavalla. Orgaaninen aines saattaa vähentää sitoutumista viemällä sitoutumispaikkoja tai lisätä sitoutumista epäsuorasti, sillä orgaanisessa aineksessa on usein alumiinin ja raudan oksideja, joihin fosfori ja glyfosaatti voivat sitoutua [8].

Glyfosaatti voi sitoutua myös maaperässä olevaan humukseen vetysidoksilla [7,8]. Glyfosaatin happi ja fosfonaatti-ryhmän hydroksidi voivat sitoutua humushapon funktionaalisiin ryhmiin muodostamalla vetysidoksen niiden välille. Humushappoon sitoutuminen on vahvempaa happamammassa maaperässä (pH 4) kuin neutraalimassa (pH 6). Tämä johtuu glyfosaatin fosfonaatti-ryhmän deprotonoitumisesta ekvivalenttipisteessä 5.46 (katso kuva 2), jolloin vetysidoksia pääsee muodostumaan vähemmän glyfosaatin ja humushapon välille. [12]

3.2 Kulkeutuminen ja huuhtoutuminen

Vaikka glyfosaatin sitoutuminen maaperään voikin olla voimakasta, se pystyy myös kulkeutumaan pintakerroksista syvemmälle maaperään [4]. Glyfosaattia saattaa joutua syvempiin maakerroksiin esimerkiksi, jos torjunta-ainetta käytetään maan ollessa märkä ja pian käytön jälkeen sataa rankasti [7]. Kulkeutuminen on voimakkaampaa hiekkaisessa maaperässä kuin orgaanista ainesta sisältävässä maassa [4]. Myös fosforirikkaassa maaperässä, jossa glyfosaatti kilpailee sitoutumispaikoista fosforin kanssa, riski glyfosaatin kulkeutumiseen on kasvanut [7]. Glyfosaatti voi kulkeutua syvemmälle maahan myös kasvien juuristoa pitkin [3].

Sadannalla on oleellinen vaikutus glyfosaatin kulkeutumiseen pohjaveteen ja muihin vesistöihin [4]. Glyfosaatti voi huuhtoutua veden mukana joko veteen liuenneena tai kiintoainehiukkasiin sitoutuneena. Huuhtoutuminen voi tapahtua joko maakerrosten läpi, jolloin glyfosaatti päätyy salaojaverkkoihin ja pohjaveteen, tai maan pinnalla valuvan veden mukana. Pintavesivalunnasta glyfosaatti päätyy avovesiin kuten jokiin ja järviin. [8] Riski glyfosaatin huuhtoutumiseen on suuri esimerkiksi silloin, kun sataa rankasti pian glyfosaatin käytön jälkeen [6]. Glyfosaattia on löytynyt pohjavedestä määritysrajan (0.1 µg/L) ylittäviä pitoisuuksia alueilla, joilla maaperä on hyvin karkeaa. Esimerkiksi soraisilla rautateiden vierillä, joilla käytetään runsaasti glyfosaattia rikkakasvien torjumiseksi, glyfosaattia saattaa päätyä pohjaveteen asti. [8]

Sateen vaikutusta glyfosaatin kulkeutumiseen tutkittiin laboratorio-oloissa vertaamalla kahta maanäytettä, joista toista kasteltiin runsaasti. Mittaukset suoritettiin 21

päivää glyfosaatin levittämisen jälkeen. Maassa, jota ei kasteltu, 44 % glyfosaatista pysyi 0-10 cm syvyydellä maanpinnasta ja 14 % kulkeutui 10-20 cm syvyyteen. Glyfosaattia ei löytynyt 20-30 cm syvyydellä maanpinnasta. Kastellussa maassa vastaavat luvut olivat 34 % ja 20 %, minkä lisäksi 6 % glyfosaatista päätyi 20-30 cm syvyyteen. Maaperässä oli myös mikrobeja, jotka hajottivat molemmissa tapauksissa osan glyfosaatista. [4]

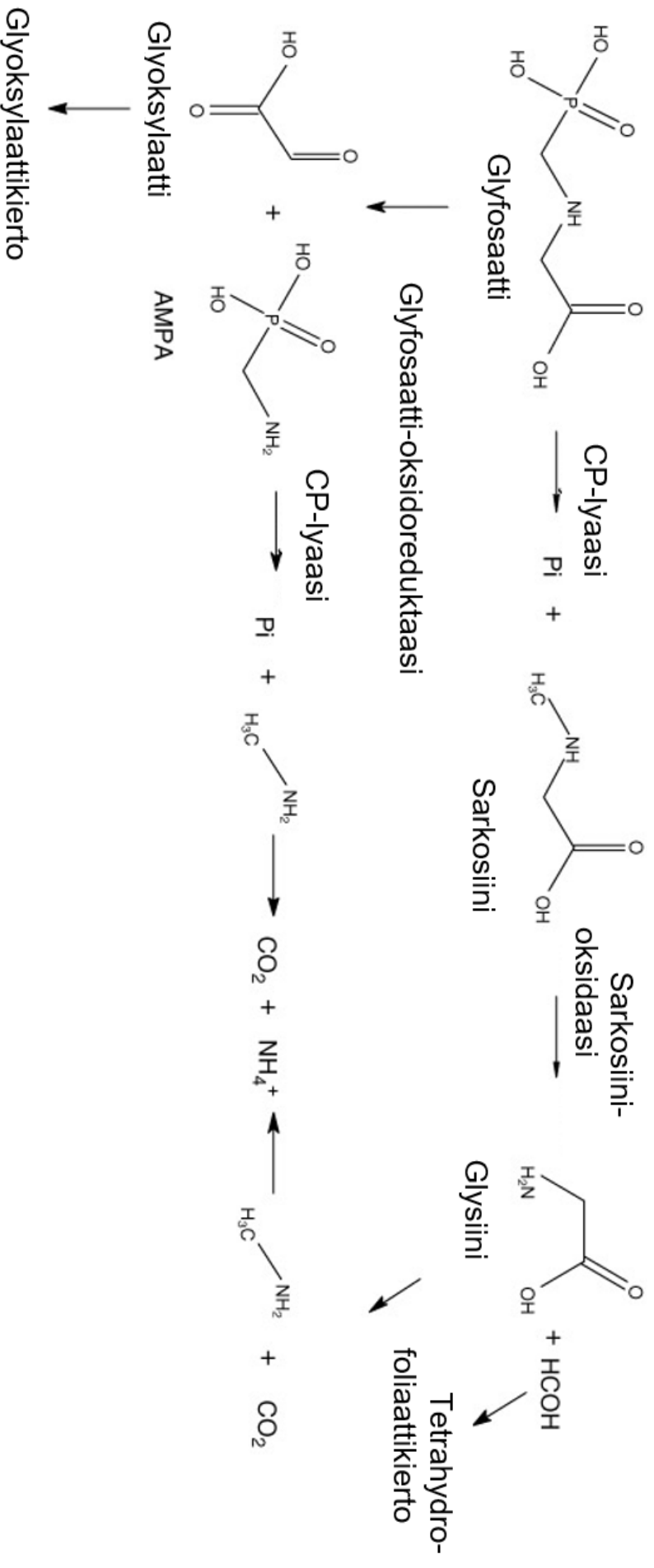
4. MIKROBIT GLYFOSAATIN HAJOTTAJINA

Mikrobeilla on kaksi vaihtoehtoista metaboliareittiä glyfosaatin hajottamiseen. Reiteille yhteistä on C-P-lyyaasientsyymin toiminta, mutta ne eroavat primäärisiltä hajoamistuotteiltaan. [5,8] Toisella reitillä glyfosaatti hajotetaan ensin AMPA:ksi ja glyoksylaatiksi, toisella taas fosfaatiksi ja sarkosiiniksi [8]. Jotkin mikrobit voivat käyttää glyfosaattia fosforin, hiilen tai typen lähteenä [3].

4.1 Hajottaminen käytännössä

Metaboliareitti, jonka hajoamistuotteena syntyy AMPA:a, alkaa hiili-typpi -sidoksen katkaisulla (kuva 4; vasemmasta yläkulmasta alaspäin lähtevä reitti). Katkaisusta vastaa glyfosaattioksidoreduktaasi-entsyymi ja reaktion tuotteina syntyy AMPA:a ja glyoksylaattia. [5,8] Glyoksylaatti jatkaa glyoksylaattikiertoon, jossa siitä muokataan muita tuotteita. AMPA:n hajottamista jatketaan C-P-lyyaasilla, joka katkaisee hiilen ja fosforin välisen sidoksen. Tuotteina syntyy epäorgaanista fosfaattia ja metyyliamiinia, joka lopulta hajoaa hiilidioksidiksi ja ammoniakiksi. [8] Mikrobit, jotka käyttävät glyfosaattia hiilenlähteenään, käyttävät yleensä tätä hajottamisreittiä [3].

Toisella mahdollisella metaboliareitillä tapahtuu ensin fosforin ja hiilen välisen sidoksen katkaisu C-P-lyyaasilla (kuva 4; vasemmasta yläkulmasta oikealle lähtevä hajotusreitti). Glyfosaatista saadaan fosfaattia ja sarkosiinia. [5,8] Sarkosiini hajotetaan edelleen sarkosiini-oksidaasilla formaldehydiksi ja glysiiniksi, jotka puolestaan hajotetaan hiilidioksidiksi ja ammoniakiksi [8].



Kuva 4. Glyfosaatin biohajoaaminen vaiheittain, muokattu [8]. Pi = epäorgaaninen fosfori.

Joidenkin muuntogeenisten viljelykasvien resistenttiys glyfosaatille perustuu glyfosaattioksidoreduktaasi-entsyymiin. Kasvin genomiin voidaan lisätä DNA-jakso, joka koodaa tätä entsyymiä muodostavaa proteiinia, jolloin se pystyy hajottamaan glyfosaattia ja näin suojautumaan sen vaikutukselta. [5,8] Glyfosaatille resistenttejä, muuntogeenisiä kantoja on saatu kehitettyä esimerkiksi soijasta, vehnästä, maissista ja sokerijuurikkaasta, jotka ovat kaikki maailmanlaajuisesti tärkeitä viljelykasveja [13]. Glyfosaatille resistenttien kasvien kehittyminen luonnossa on epätodennäköistä, mikä johtuu glyfosaatin toimintamekanismista [11].

Kaikki mikrobit, joilla on CP-lyyaasientsyymi, eivät pysty katkaisemaan glyfosaatin hiili-fosfori-sidosta, sillä sen katkaisemiseen tarvittava CP-lyyaasi on spesifinen glyfosaatille. On kuitenkin mikrobikantoja, jotka pystyvät hajottamaan glyfosaattia, vaikka ne eivät olisikaan aiemmin altistuneet glyfosaatille (taulukko 2: tähdellä * merkityt mikrobit). Tästä voidaan päätellä, että luonnosta löytyy ainakin jokin glyfosaatille analoginen yhdiste, joka on aiheuttanut glyfosaatille spesifisen CP-lyyaasin kehittymisen. [13]

Taulukko 2. Glyfosaattia hajottavat mikrobit, [13] mukaan.

Mikro-organismi	Löytöpaikka	Primäärinen hajoaamistuote	Gram-status
Bakteerit			
<i>Achromobacter</i> spp.	Jätteenkäsittelylaitoksen aktiiviliete, alkyylifosfonaatti-kontaminoitunut maa	AMPA, sarkosiini	-
<i>Agrobacterium radiobacter</i>	Jätteenkäsittelylaitoksen aktiiviliete	Sarkosiini (oletettu)	-
<i>Alcaligenes</i> sp. GL *	Sekaviljelmä, joka sisälsi myös <i>Anacystis nidulansia</i>	Sarkosiini 95 %, AMPA 5 %	-
<i>Arthrobacter</i> spp.	Lajitelma mikrobeja ja soluviljelmiä (Saksa), sekaviljelmä, joka sisälsi myös <i>Klebsiella pneumoniaeta</i>	AMPA	+
<i>Flavobacterium</i> sp. GD1	Jätteenkäsittelylaitoksen aktiiviliete	AMPA	-
<i>Geobacillus caldoxylosilyticus</i> T20 *	Keskuslämmitysjärjestelmä	AMPA	+
<i>Ochrobactrum anthropi</i> spp.	Glyfosaatti-kontaminoitunut maaperä, maaperä	AMPA	-
<i>Pseudomonas</i> spp.	Glyfosaatti-kontaminoitunut maaperä, sekaviljelmä, joka sisälsi myös <i>P. aeruginosaa</i> , jätteenkäsittelylaitoksen aktiiviliete	AMPA, sarkosiini, AMPA 95 % ja sarkosiini 5 %	-
<i>Rhizobium meliloti</i> 1021	Villityypin spontaani mutaatio	Sarkosiini	-
<i>Streptomyces</i> sp. StC	Jätteenkäsittelylaitoksen aktiiviliete	Sarkosiini	+
Sienet			
<i>Aspergillus niger</i>	Maaperä	AMPA	
<i>Penicillium notanum</i>	Spontaani kasvu hydroksifluorenyyli-9-fosfaattiin	AMPA	
<i>Scopulariopsis</i> sp.	Maaperä	AMPA	
<i>Trichoderma harzianum</i>	Maaperä	AMPA	

Suurin osa glyfosaattia hajottavista mikrobeista on bakteereita (taulukko 2), joita voidaan löytää esimerkiksi glyfosaatilla kontaminoituneesta maasta tai jätteenkäsittelylaitoksen aktiivilietteestä [13]. Yleisimmin nämä bakteerit ovat gram-negatiivisia ja ne käyttävät hajottamiseen reittiä, jossa glyfosaatti hajotetaan ensin AMPA:ksi ja glyoksylaatiksi.

Viimeaikaisten tutkimusten mukaan näyttäisi siltä, että mikrobeilla on näiden kahden metaboliareitin lisäksi mahdollisesti muitakin tapoja hajottaa glyfosaattia. Esimerkiksi bakteerientsyymi glysiini-oksidaasi voisi myös hajottaa glyfosaatin AMPA:ksi ja glyoksylaatiksi. [13]

Biohajoamisen määrää tutkittiin kenttäolosuhteissa lisäämällä maaperään glyfosaattia sekä mikrobeja. Sekaviljelmässä (joka sisälsi muun muassa *O. anthropi* GPK 3 -kannan bakteereita) kasvatetut mikrobit hajottivat 21 päivässä 42 % maahan levitetystä glyfosaatista (21 mg glyfosaattia 1 kg maata kohden). Suurin osa glyfosaatista eli 31 % hajotettiin tutkimuksen ensimmäisen viikon aikana. Samassa tutkimuksessa mitattiin myös maaperässä luontaisesti esiintyvien mikrobien hajotustoimintaa. Alkuperäiset bakteerit hajottivat vain 10-12 % maaperään levitetystä glyfosaatista (5 mg glyfosaattia / 1 kg maata). [4] Toisessa tutkimuksessa kartoitettiin tiettyjen bakteerikantojen hajotuspotentiaalia. *Achromobacter* sp. Kg 16 -bakteerit hajottivat 65,8 % maassa olevasta glyfosaatista (38,6 mg glyfosaattia / 1 kg maata) laboratorio-oloissa 21 päivää kestäneessä tutkimuksessa. Kenttätutkimuksessa, jonka kesto oli 28 päivää, nämä bakteerit hajottivat 75,2 % (44,5 mg / kg) glyfosaatista. *O. anthropi* GPK 3 -kannan bakteereilla tulokset olivat 49,5 % maassa olevasta glyfosaatista (29,5 mg / kg) laboratoriossa ja 61,5 % (37,9 mg / kg) kenttäoloissa. Molemmilla bakteereilla glyfosaatin biohajoamista tapahtui selvästi eniten ensimmäisen viikon aikana. [2]

4.2 Hajotustoimintaan vaikuttavat tekijät

Tutkimukset glyfosaatin biohajoamisesta ovat antaneet vaihtelevia tuloksia. Joidenkin tutkimusten mukaan glyfosaatin biohajoaminen lisääntyy mikrobien yleisen aktiivisuuden lisääntyessä. Muita mahdollisia vaihtoehtoja ovat biohajoamisen lisääntyminen mikrobien biomassan kasvaessa tai mikrobien respiraation lisääntyessä. [8] Tanskalaisessa tutkimuksessa glyfosaatin biohajoaminen oli vahvimmin yhteydessä maaperän *Pseudomonas* -suvun bakteerien määrään [7]. Glyfosaatin biohajoaminen ja sorptio vaikuttaisivat olevan kääntäen verrannolliset: mikrobit eivät yleensä pysty käyttämään maaperän hiukkasiin sitoutunutta glyfosaattia prosesseissaan [4,8]. Korkeampi sitoutumisaste siis parantaa glyfosaatin säilymistä maaperässä [4].

Tutkimuksessa, jossa tutkittiin biohajoamisen määrää eri maatyypeissä, tulokset vaihtelivat savisen ja soraisen maaperän välillä paljon. Soraisessa maaperässä (alhaisin sorptiotaso) biohajoamisen osuus oli 30 %, kun savisessa maaperässä glyfosaatista hajosi vain 2 %. [2] Toisessa tutkimuksessa ero oli vielä suurempi; glyfosaatin hajoaminen vaihteli 40 %:ista 5 %:iin eri maalajeissa [8]. Toisaalta alumiinin ja raudan oksideihin sitoutuessaan glyfosaatin karboksyyliryhmä jää vapaaksi sidoksesta, jolloin glyfosaatti on alttiina biohajoamiselle [10].

Mikrobien hajotustoimintaan vaikuttaa myös maaperässä olevan fosforin määrä. Koska osa mikrobeista voi käyttää glyfosaattia fosforin lähteenä, vähentää maaperässä oleva fosfori glyfosaatin hajottamista. Syy biohajoamisen vähenemiseen on CP-lyasientsyymin aktiivisuudessa; entsyymi toimii aktiivisesti silloin, kun fosforia ei ole saatavilla. Tutkimuksia on tehty esimerkiksi *Flavobacterium*- ja *Pseudomonas*-suvun bakteereilla. *Flavobacterium* -suvun bakteerit hajottivat glyfosaatin AMPA:ksi ja glykoxylaatiksi, mutta eivät enää AMPA:a fosfaatiksi ja metyyliamiiniksi, jos maaperässä oli käytettävissä olevaa fosforia. *Pseudomonas* -suvun bakteerit eivät hajottaneet glyfosaattia fosforirikkaassa maassa. Toisaalta fosforin lisääminen saattaa myös lisätä hajotustoimintaa. Jos fosforia lisätään maaperään, jossa glyfosaatti ja fosfori kilpailevat samoista sitoutumispaikoista, glyfosaatin hajottaminen lisääntyy, koska sitä on mikrobeille paremmin saatavilla olevassa muodossa. Kaikkien mikrobien hajotustoimintaan maaperän korkealla fosforipitoisuudella ei kuitenkaan ole vaikutusta. [8]

Mikrobit hajottavat glyfosaattia sekä aerobisissa että anaerobisissa olosuhteissa, tosin hajotustoiminta on yleensä vähäisempää anaerobisissa oloissa [8]. Glyfosaattia hajottavien mikrobien aktiivisuus vähenee syvemmällä maaperässä, jossa mikrobeita myös on vähemmän kuin lähempänä maan pintaa. Shuskova et al. tutkimuksessa *Ochrobactrum anthropi* -bakteerit elivät ja hajottivat glyfosaattia lähellä maan pintaa, mutta ne eivät selvinneet syvemmällä maaperässä. *O. anthropi* -bakteerisolujen määrä oli noin 4000 kertaa suurempi pinnan läheisyydessä (0-10 cm maan pinnasta) kuin 10-20 cm maanpinnan alapuolella, eikä 20-30 cm syvyydessä soluja ollut enää kuin harvakseltaan. [4]

Korkea glyfosaatin konsentraatio näyttäisi lisäävän maaperän mikrobeiden respiraatiota. Tutkimuksissa matalan konsentraation (alle 200mg/kg) glyfosaatti vähensi respiraation määrää, kun taas korkeampikonsentraatioinen glyfosaatti (yli 200mg/kg) lisäsi respiraatiota. Maaperän pH vaikuttaa myös respiraatioon, sillä neutraalissa tai vain vähän happamassa maaperässä glyfosaatin vaikutus respiraatioon oli useammin negatiivinen kuin happamammassa. [1] Glyfosaatilla näyttäisi kuitenkin olevan suurempi vaikutus mikrobien anaboliaan kuin respiraatioon. Glyfosaatti huomattiin inhiboivan

mikrobimassan kasvua, joskaan ei ollut selvää, johtuiko inhiboiva vaikutus glyfosaatista itsestään vai jostain sen hajoamistuotteesta. [10]

4.3 Mikrobit glyfosaatilla pilaantuneen maaperän kunnostajina

Koska glyfosaatin on todettu aiheuttavan joitain haittoja eliöstössä, olisi sen akkumulaatio maaperään hyvä estää hajottamalla se vähemmän myrkyllisiksi aineiksi. Glyfosaatin hajottamisessa hyödynnettävien mikrobien tulisi olla turvallisia ja pystyä hajottamaan glyfosaattia tehokkaasti olosuhteista riippumatta. Mikäli glyfosaattia hajottavia mikrobeja ei olisi valmiiksi maaperässä vaan ne täytyisi levittää sinne, eivät mikrobit saisi olla patogeenisiä tai muuten myrkyllisiä. Optimaalisessa tilanteessa mikrobien hajotustoimintaan ei vaikuttaisi hajottamisen tuloksena syntyvien tuotteiden määrä. Kaikilla tavoin ihanteellista mikrobia ei olla vielä onnistuttu löytämään, mutta hajottamisen onnistumiseen voidaan vaikuttaa muillakin tavoilla. [13] Esimerkiksi maanmuokkaustapa ja torjunta-aineen käytön suunnittelu sääolosuhteiden mukaan vaikuttavat glyfosaatin säilymiseen maaperässä [2].

Kaikilla mikrobeilla on optimilämpötila, jossa ne muun muassa lisääntyvät kaikista tehokkaimmin. Suurimmalla osalla mikrobeista tämä optimilämpötila on korkeampi kuin nolla Celsius-astetta, joten myös biohajoamista tapahtuu vähemmän kylmillä alueilla tai talvisin kuin lämpimillä alueilla ja kesäisin. Biohajoamisen kannalta glyfosaattipohjaisten torjunta-aineiden käyttö kannattaa siis ajoittaa kevääseen tai alkukesään, jotta mikrobit ehtivät hajotustyöhön ennen talvea ja maaperän jäätymistä. Esimerkiksi yhdessä tutkimuksessa glyfosaatin puoliintumisajaksi mitattiin kasvukaudella (aika, jolloin kasvit kasvavat; Suomessa vuorokauden keskilämpötila yli 5 astetta) alle kaksi kuukautta, kun talvella puoliintuminen kesti 7-8 kuukautta. [6] Myös maan keskilämpötilan nousun uskotaan lisäävän glyfosaatin biohajoamista. [8].

Suurin osa glyfosaattia hajottavista mikrobeista tarvitsee prosesseissaan happea, joten maaperän happipitoisuuden nouseminen parantaa glyfosaatin biohajoamista. Hapen määrään maaperässä puolestaan vaikuttavat muun muassa maanmuokkaustapa ja kosteus. Esimerkiksi kyntäminen kuohkeuttaa tiivistynyttä maata ja sekoittaa maan joukkoon ilmaa. Kyntämällä saadaan myös vähennettyä glyfosaatin kulkeutumista syvemmälle maaperään, jossa mikrobeja on vähemmän ja näin myös hajotustoiminta on vähäisempää. [6]

Myös ravinteiden ja maanparannusaineiden käytöllä on vaikutusta glyfosaatin hajoamiseen. Maaperän kalkitsemisen on havaittu lisäävän glyfosaatin sorptiota maaperään, mikä puolestaan vähentää glyfosaatin biosaataavuutta. Lisääntyneen sorption uskotaan johtuvan sidosten määrän kasvamisesta glyfosaatin sekä alumiini- ja

rautaoksidien välillä, mikä puolestaan johtuu pH:n nousemisesta. [7,8] Toisaalta kalkitsemisella aikaansaatava pH:n nousu voi olla hyödyllistä mikrobeille. Esimerkiksi *O. anthropi* GPK 3 -kannan bakteereiden kasvulle ja hajotustoiminnalle optimaalisin maaperän pH-arvo oli erään tutkimuksen mukaan 6-7. Samassa tutkimuksessa selvitettiin myös fosforiravinteiden vaikutusta glyfosaatin biohajoamiseen. Parhaimmat hajotustulokset saatiin, kun bakteereille ei annettu glyfosaatin lisäksi muita fosforiravinteita. Metyylifosfonaattia lisättäessä hajotustulos pieneni 75 %:iin ja epäorgaanista fosforia käytettäessä puoleen, kun tuloksia verrattiin pelkän glyfosaatin lisäämiseen. [15]

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Yleisesti ottaen glyfosaatin sorptio maaperään on voimakasta, joskin sorptio vaihtelee paljon eri maalajien välillä. Tärkeimpiä glyfosaatin sorptioon vaikuttavia tekijöitä ovat maaperän kationit, erityisesti raudan ja alumiinin kationit, maaperän pH sekä maaperän fosfaattipitoisuus. Otollisimmat olosuhteet glyfosaatin sorptiolle olisi maaperässä, joka sisältää runsaasti kationeja, vähän fosfaattia ja jonka pH on suhteellisen alhainen (happaman puolella). Kemiallisten tekijöiden lisäksi esimerkiksi maahiukkasten koolla ja ilmastolla on vaikutusta sorptioon. Sadevesi voi huuhtoa glyfosaattia pintamaasta myös syvemmälle maaperään tai vesistöihin.

Glyfosaatin voimakas sorptio maaperään voi hidastaa sen hajoamista, samoin kuin kylmä ilmasto. Glyfosaatin puoliintumisen onkin todettu kestävän joillain alueilla jopa satoja päiviä. Hitaan hajoamisen ja runsaan käytön vuoksi glyfosaatti saattaa kertyä ympäristöön, missä sen on todettu aiheuttavan haittaa osalle eliöistä. Glyfosaatti on myrkyllistä muun muassa sammakkoeläimille ja nuijapäille, eikä kaikkia sen aiheuttamia ongelmia välttämättä tunneta. Glyfosaatin haittavaikutuksia ympäristölle ja ihmisille pitäisi vielä tutkia, samoin kuin sen kertymistä ympäristöön ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Ratkaisuna glyfosaatin kertymiseen voisivat toimia mikrobit. Osa mikrobeista pystyy biohajottamaan glyfosaattia ja käyttämään sitä hiilen, typen ja fosforin lähteenä. Mikrobeilla on kaksi vaihtoehtoista reittiä glyfosaatin hajottamiseksi, joista toisella syntyy primäärisenä hajoamistuotteena AMPA:a ja toisella sarkosiinia. Tärkeimmät löydetty glyfosaattia hajottavat mikrobit ovat bakteereita, ja niitä on löydetty esimerkiksi maaperästä ja jätteenkäsittelylaitoksen aktiivilietteestä. Mikrobit ovat luonnollisia puhdistajia ja glyfosaatin sisältämät ravinteet palautuvat niiden avulla takaisin luonnon kiertokulkuun.

Glyfosaatin biohajoamista täytyy kuitenkin vielä tutkia, ennen kuin mikrobeja voidaan suunnitelmallisesti käyttää maaperän puhdistajina. Puhdistuksessa käytettävän mikrobin pitäisi hajottaa glyfosaattia tehokkaasti monenlaisissa ympäristöissä eikä se saisi olla patogeeninen tai muuten myrkyllinen. Biohajoamiselle optimaalisten olosuhteiden löytäminen on vaikeaa, sillä joidenkin tekijöiden vaikutusta hajoamiseen voi olla vaikea ennustaa. Esimerkiksi fosforiravinteiden lisääminen maaperään saattaa vähentää glyfosaatin sorptiota maaperään, jolloin se on paremmin saatavilla biologisiin prosesseihin, tai vähentää biohajoamista, sillä mikrobeille on tarjolla helpommin saatavilla oleva fosforin lähde.

LÄHTEET

- [1] D. B. Nguyen, M. T. Rose, T. J. Rose, Impact of glyphosate on soil microbial biomass and respiration: A meta-analysis, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 92, 2016, s. 50-57
- [2] I. T. Ermakova, N. I. Kiseleva, T. Shushkova, Bioremediation of glyphosate-contaminated soils, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Sep 2010, s. 585-594
- [3] N. Wijekoon, N. Yapa, Assessment of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on potential biodegradation of glyphosate in contaminated soil and aquifers, *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 7, 2018, s. 465-469
- [4] T. Shushkova, I. Ermakova, A. Leontievsky, Glyphosate bioavailability in soil, *Biodegradation* Volume 21, 2010, s. 403-410
- [5] M. C. Flickinger, *Encyclopedia of Industrial Biotechnology, Bioprocess, Bioseparation, and Cell Technology, Volumes 1-7 - Herbicide Tolerant Plants, Production.* (pp. 2797). John Wiley & Sons. 2010
- [6] P. Laitinen, S. Rämö, U. Nikunen et al., Glyphosate and phosphorus leaching and residues in boreal sandy soil, *Plant and Soil*, Volume 323, 2009, s. 267-283
- [7] H. Vereecken, Mobility and leaching of glyphosate: a review, *Pest management science*, Volume 61, 2005, s. 1139-1151
- [8] O. K Borggaard, A. L. Gimsing, Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review, *Pest management science*, Volume 62, 2008, s. 441-456
- [9] G. von Mérey, P. S. Manson, A. Mehrsheikh et al., Glyphosate and aminomethylphosphonic acid chronic risk assessment for soil biota, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, s. 2742-2752
- [10] Y. Schnürer, P. Persson, M. Nilsson, A. Nordgren, R. Giesler, Effects of Surface Sorption on Microbial Degradation of Glyphosate, *Environmental Science & Technology*, Volume 40, 2006, s. 4145-4150

- [11] A. D Baylis, Why glyphosate is a global herbicide: strengths, weaknesses and prospects, *Pest Management Science*, Volume 56, 2000, s. 299-308
- [12] C. N. Albers, G. T. Banta, P. Erik Hansen, O. S. Jacobsen, The influence of organic matter on sorption and fate of glyphosate in soil – Comparing different soils and humic substances, *Environmental Pollution*, Volume 157, 2009, s. 2865-2870
- [13] A. V. Sviridov, T. V. Shushkova, I. T. Ermakova, E. V. Ivanova, D. O. Epik-tetov, A. A. Leontievsky, Microbial Degradation of Glyphosate Herbicides (Review), *Applied Biochemistry and Microbiology*, Volume 151, 2015
- [14] M. E. Richmond, Glyphosate: A review of its global use, environmental impact, and potential health effects on humans and other species, *Journal of Environmental Studies and Sciences*, Volume 8, 2018, s. 416-434
- [15] T. V. Shushkova, I. T. Ermakova, A. V. Sviridov, A. A. Leontievsky, Biodegradation of glyphosate by soil bacteria: Optimization of cultivation and the method for active biomass storage, *Microbiology*, Volume 81, 2012, s. 44-50