

Recirkulering av restprodukter och gynnande av arbuskulär mykorrhiza

- Två möjliga faktorer i strävan mot ett hållbart fosfornyttjande?

Recirculation of waste products and enhancement of arbuscular mycorrhiza

- Two possible factors in the pursuit of sustainable phosphorus utilization?

Karl-Johan Fabó



Recirkulering av restprodukter och gynnande av arbuskulär mykorrhiza

- Två möjliga faktorer i strävan mot ett hållbart fosfornyttjande?

Recirculation of waste products and enhancement of arbuscular mycorrhiza

- Two possible factors in the pursuit of sustainable phosphorus utilization?

Karl-Johan Fabó

Handledare: Siri Caspersen, SLU, Institutionen för biosystem och teknologi

Examinator: Håkan Asp, SLU, Institutionen för biosystem och teknologi

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: G2E

Kurstitel: Kandidatarbete i biologi

Kurskod: EX0493

Program/utbildning: Trädgårdsingenjör:odling – kandidatprogram

Utgivningsort: Alnarp

Utgivningsår: 2018

Omslagsbilder: (Ö.v:) Jordbruksfält i Pune, Indien av Abhay Magdum (Ö.h:) Fosfatgruva i Israel, Phosphorite Mine Oron Israel 070313 av Mark A. Wilson (CC0 1.0) (N.v:) Biogasanläggning, Biogas av Volker Thies (Asdrubal) (CC BY-SA 3.0) (N.h:) Arbuskel hos arbuskulär mykorrhiza av Mark Brundrett

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: *Mykorrhiza, arbuskulär mykorrhiza, fosfor, fosforbrist, växtnäring, kretsloppsprodukter, restprodukter, tungmetaller, organiska föreningar*

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Institutionen för biosystem och teknologi

Förord

Under utbildningen har jag ofta tänkt att marklära, mikroliv och växtnäring är något som det tåls att fördjupa sig ytterligare i. Under en föreläsning, där SLU-forskaren Georg Carlsson föreläste om odlingssystem för ett effektiviserat näringsnyttjande, kom den framtida eventuella fosforbristen på tal. Under de år som jag har jobbat praktiskt med trädgård har begreppet mykorrhiza ofta dykt upp. Det har skrivits många artiklar om mykorrhiza i trädgårdstidsskrifter, i ett skogsträdgårdsprojekt där jag var delaktig testades mykorrhizainokulering för att understödja trädets etablering och det finns även ett odlingsnätverk som är uppkallad efter symbiosen. Under utbildningen höll Siri Caspersen, som är kursledare för kursen Växtfysiologi för trädgårdsingenjörer, en föreläsning om mykorrhiza. Hon bedriver forskning vid SLU kring mykorrhiza och växters näringsupptag och det var hon som kom att leda in mina tankar på det spår som examensarbetet är ett resultat av. Det har varit roligt att arbetet har kunnat täcka in flera områden som jag velat lära mig mer om. Jag vill rikta ett stort tack till Siri Caspersen som har handlett mig under arbetets gång och som har delat med sig av sina kunskaper och sin tid. Även mina forna kollegor på Trädgårdsföreningen i Göteborg vill jag tacka, för uppmuntran till fortsatta studier. Sist men inte minst vill jag även tacka min familj och mina vänner som är en ständig källa till motivation.

Karl-Johan Fabó
16 maj 2018, Malmö

Sammandrag

Låg förekomst av växttillgänglig fosfor är en begränsande faktor för grödors tillväxt på många odlingsmarker. Under det senaste århundrandet har odlare i allt högre utsträckning kommit att använda mineralgödsel för att kunna erhålla tillräckligt stora skördar. Råfosfat, som används som råvara vid framställning av mineralgödselmedel, är en ändlig resurs. En framtida brist på råfosfat kan komma att äventyra den globala matsäkerheten. Utöver det är överanvändning av mineralgödsel förknippat med negativ miljöpåverkan, såsom övergödda akvatiska ekosystem. Möjligheter finns dock att effektivisera fosforanvändandet inom jordbruket. Lantbruk, industri och stad producerar kontinuerligt stora mängder fosforinnehållande avfall. Olika restprodukter kan återföras till odlingsmarker i högre utsträckning än vad det idag görs, i strävan att sluta de antropogena fosforkretsloppen.

Det här arbetet tar upp ett urval fosforinnehållande restprodukter, där vissa redan idag återförs i stor utsträckning medan andra kan ha potential till att användas i högre grad. Dessa skiljer sig gällande påverkan på markegenskaper, såsom näringskoncentrationer, mullhalt, markstruktur och påverkan på mikroliv.

Arbuskulär mykorrhiza (AM) är en vanligt förekommande symbios mellan växter och vissa grupper av svampar som kan gynna växters fosforupptag. Att gynna förekomst av AM inom jordbruket har föreslagits vara en faktor för ett mer hållbart fosfornyttjande. Många biotiska och abiotiska faktorer påverkar förekomst av AM. Arbuskulära mykorrhizasvampar (AMF) missgynnas ofta av förhöjda halter av växttillgänglig fosfor till följd av mineralgödning. I flertalet av de studier som inkluderats i detta arbete har tillförsel av restprodukter gynnat förekomst av AM, vilket i sin tur lett till gynnande av grödors fosforupptag.

Risker med föroreningar som i olika utsträckning förekommer i restprodukter är ett omdiskuterat problem. Vid förekomst av tungmetaller och organiska föroreningar har det konstaterats att mykorrhizakoloniserade rötter i vissa fall kan begränsa bioackumulering av gifter. Många svåröverblickbara faktorer spelar dock in och i vissa fall kan ett ökat upptag av föroreningar istället erhållas. Det verkar därför inte vara ett alternativ att förlita sig på rotkolonisering för att säkra giffria grödor.

Utifrån litteraturen som inkluderats i detta arbete dras slutsatsen att det finns stora möjligheter till att recirkulera fosfor i högre utsträckning än vad det görs idag. Tillsammans med arbuskulära mykorrhizasymbioser kan det bidra till ett mer hållbart fosfornyttjande. Det kan finnas behov av att utveckla enkla analysmetoder för att kunna analysera jordbruksmarkens AMF-status, så att odlare kan välja rätt åtgärder för att upprätthålla markens AMF-samhällen. Vid förädling av moderna grödor har ibland grödors AMF-kompatibilitet försämrats. Därför finns det potential för nutida förädlare att ta fram grödor som är mer kompatibla med AMF. Det är dock viktigt att föroreningshalter i restprodukter hålls under bestämda gränsvärden för att inte riskera att jordbruksmarker och grödor kontamineras. Här kan certifierings- och övervakningssystem ha en roll att spela. Utöver det kan det vara fördelaktigt att använda moderna tekniker för att extrahera koncentrerade föroreningsfria fosfatföreningar ur avfall.

Summary

On many arable fields the low presence of plant available phosphorus is a limiting factor for crop growth. Over the past century the usage of mineral fertilizers has increased, for growers to be able to secure sufficient yields. Rock phosphate, which is the raw material in production of mineral fertilizers, is a finite resource. A future shortage of mineable raw phosphates may endanger global food security. In addition to this, overuse of mineral fertilizers is associated with adverse environmental impacts, such as eutrophication of aquatic ecosystems. However, there are possibilities for more efficient phosphorous usage in agriculture/horticulture. Agriculture, industry and cities continuously produce large amounts of phosphorus-containing waste products. In the pursuit of closing the anthropogenic phosphorus cycle, phosphorus-containing residues could be returned to the fields in a greater extent than today.

This bachelor thesis addresses a selection of phosphorus-containing residues, some of which are already to a large extent being recycled, while others have the potential to be reused to a greater extent. The impact on soil characteristics, such as nutritional concentrations, organic matter content, soil structure and impact on micro-life, differ between the different waste products.

Arbuscular mycorrhiza (AM) is an often occurring symbiosis between plants and certain groups of fungi that are known to be able to favour plant growth. It has been proposed that promoting the presence of AM can be beneficial in creating a sustainable phosphorus utilization in crop production. Many biotic and abiotic factors affect the occurrence of AM. Arbuscular mycorrhiza fungus (AMF) are often disadvantaged by elevated concentrations of plant available phosphorus, as a result of mineral fertilization. In most of the studies included in this thesis, the additions of waste products have favoured the presence of AM, which in turn has led to increased plant phosphorus uptake.

Pollution that occurs in various waste products is an often discussed issue. It has been found that mycorrhiza colonized roots in some cases may limit the bioaccumulation of toxins. However, many complex factors are involved. In some cases increased uptake of contaminants may be obtained instead. Therefore, it does not appear to be an option to rely on root colonization to ensure crops free from contaminants.

Based on the literature included in this work, one can conclude that there are good opportunities for recycling phosphorus to a greater extent than today. Together with arbuscular mycorrhiza, it can contribute to a more sustainable phosphorus utilization. It could be needed to develop easy-to-use analytical methods to analyse the AMF status in soils, so that growers can choose the right measures to maintain the field's AMF populations. The breeding of modern crops has sometimes resulted in decreased AMF compatibility. Therefore, there are potential for breeders of today to breed new crop varieties that are more compatible with AMF. However, it is important that pollutants in waste products are kept below certain limits in order to avoid the risk of contaminating farmland and crops. Certification- and monitoring systems can play a role in that pursuit. In addition, it may be advantageous to use modern techniques to extract concentrated pollutant-free phosphate compounds from waste products.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Frågeställningar	6
1.3	Syfte	6
1.4	Mål	6
1.5	Avgränsningar	6
2	Metod och material	7
3	Fosfor	8
3.1	Stundande global fosforbrist	8
3.2	Fosfor i restprodukter	9
4	Mykorrhiza	11
4.1	Arbuskulär mykorrhiza	11
4.2	Arbuskulär mykorrhiza och fosfor	12
5	Restprodukter, arbuskulär mykorrhiza och fosforupptag	13
5.1	Avloppsslam	13
5.2	Biogödsel	15
5.3	Biokol	16
5.4	Struvit	17
5.5	Benmjöl	18
5.6	Stallgödsel	19
6	Restprodukter, arbuskulär mykorrhiza och förekomst av oönskade ämnen	21
6.1	Föroreningar i fosforgödselmedel	21
6.2	Arbuskulär mykorrhiza och föroreningar	22
6.3	Arbuskulär mykorrhiza och tungmetaller - några studier	22
7	Diskussion	25
7.1	Arbuskulär mykorrhiza för effektivt fosfornyttjande vid användning av restprodukter ...	25
7.2	Arbuskulär mykorrhiza för att begränsa grödors upptag av föroreningar	27
8	Slutsatser	29
9	Referenser	30

Introduktion

1.1 Bakgrund

Som ett av växters makronäringsämnen är fosfor nödvändigt för grödors normala tillväxt och utveckling (Evert & Eichhorn, 2013; Eriksson et al., 2015). På många jordbruksmarker är låga halter av växttillgänglig fosfor ofta en begränsande faktor för att god avkastning ska kunna erhållas (Faucon et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011). Människan har sedan långt tillbaka i historien recirkulerat organiskt material för att öka jordars bördighet (Eriksson et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011). Först under det senaste århundradet har den globala livsmedelsförsörjningen blivit allt mer beroende av att tillföra fosfor i form av mineralgödsel (Eriksson et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011) för att kunna täcka den ökade befolkningens livsmedelsbehov (Tidåker, 2011; Dawson & Hilton, 2011, Linderholm, 2011).

Det råder delade meningar om hur länge världens brytbara fosforreserver kommer att räcka (Selinus, 2011; Cordell & Rosemarin, 2011). Många forskare är dock eniga om att en stundande fosforbrist är ett reellt problem som bör tas på allvar (Cordell & Rosemarin, 2011, Selinus, 2011; Dawson & Hilton, 2011). Fosfatreserverna är dessutom geografiskt ojämnt fördelade och gruvdriften är ofta förknippad med miljöförstöring (Cooper et al. 2011; UGGS, 2018; UNEP & IFA, 2001). Utöver det resulterar dagens överanvändning av fosforgödsel ofta i utlakning med rubbade akvatiska ekosystem som följd (WWF, 2010; Faucon et al., 2015).

Möjligheter finns att förbättra de kraftigt människopåverkade fosforkretsloppen (Karunanithi, 2015; Johansson, 2011; Linderholm & Mattsson, 2013). Jordbruk, industri och stad producerar kontinuerligt stora mängder avfall som kan utgöra användbara fosforresurser (Karunanithi, 2015; Linderholm & Mattsson, 2013). I vissa fall kan restavfall återföras direkt till jordbruket som i fallet med stallgödsel (Salomon & Wivstad, 2013). I många fall är det nödvändigt att först behandla avfallet för att minska halter av föroreningar, underlätta transport och/eller öka näringsämnenas växttillgänglighet (Salomon & Wivstad, 2013; Palm, 2011; Kirchmann & Cohen, 2011). Risker med föroreningar som i olika utsträckning kan förekomma i avfallsprodukter är ett omdiskuterat problem (Eriksson, 2011; Sternbeck, 2011; Ottoson, 2011; Palm, 2011).

Gynnande av mykorrhizasymbioser tros kunna vara en viktig del i strävan efter ett hållbart fosfornyttjande (Roy-Bolduc & Hijri, 2011; Berutti et al., 2016; Elbon & Whalen, 2014). En majoritet av våra jordbruksgrödor ingår i symbios med arbuskulära mykorrhizasvampar (Smith & Read, 2008; Malbreil et al., 2014). Det är känt att mykorrhizasvampar kan främja växters fosforupptag (Smith & Read, 2008; Evert & Eichhorn, 2013, Mosse, 1973). Arbuskulär mykorrhizasvamp (AMF) kan dock missgynnas vid förhöjda fosforhalter i marken, ofta till följd av tillförsel av mineralgödsel (Nagahashi et al., 1996; Doude & Schenck, 1990; Mosse, 1973). Även förekomst av tungmetaller (Andrade et al., 2003, 2004; Tullio et al., 2003; Janoušková & Vosatka, 2004) och organiska föroreningar (Liu et al., 2004; Rabie, 2005; Chhabra & Jalali, 2013) har visats kunna inverka negativt på markens AMF-samhällen. Samtidigt finns studier som visar att arbuskulär mykorrhiza (AM) kan hämma växtupptag av både organiska (Aranda et al., 2013; Wu et al., 2009) och oorganiska

föroreningar (Weissenhorn, Leyval et al., 1995, Joner & Leyval 2001; Andrade et al., 2003, 2004, Janoušková et al., 2004).

1.2 Frågeställningar

Kan tillförsel av restprodukter påverka förekomst av arbuskulära mykorrhiza i marken/odlingssubstratet?

Kan arbuskulär mykorrhiza gynna grödors upptag av fosfor vid tillförsel av restprodukter?

Kan arbuskulär mykorrhiza begränsa upptag av oönskade ämnen vid tillförsel av kontaminerade restprodukter?

1.3 Syfte

Arbetet syftar till att undersöka om recirkulering av fosforinnehållande restprodukter i kombination med förekomst av arbuskulär mykorrhiza kan bidra till att sluta de antropogena fosforkretsloppen.

1.4 Mål

Målet är att ge en övergripande bild över de effekter tillförsel av fosforinnehållande restprodukter kan ha på förekomst av arbuskulär mykorrhiza inom hortikultur och jordbruk. Därutöver är målet att undersöka om arbuskulär mykorrhiza kan ha en roll att spela gällande växters upptag av fosfor och föroreningar då restprodukter används som fosforgödsel.

1.5 Avgränsningar

I arbetet sker ingen fördjupning i de helhetsgrepp som antagligen krävs för att säkra ett effektivt fosfornyttjande (Faucon et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011). Fokuset ligger på de effekter som tillförsel av restprodukter kan ha på förekomst av arbuskulär mykorrhiza (AM) och om AM kan påverka växters upptag av fosfor och föroreningar då restprodukter nyttjas för recirkulering av fosfor.

Det finns långt fler potentiella källor för recirkulering av fosfor än de som tas upp i denna litteraturstudie (Linderholm & Mattsson, 2013; Naturvårdsverket, 2013; Karunanithi et al., 2015). Arbetet fokuserar på ett urval restprodukter som idag tillförs odlingar i Sverige och även några restprodukter med framtida möjlig potential. De restprodukter som inkluderats är: avloppsslam, biogödsel, biokol, struvit, benmjöl och stallgödsel.

Gruppen arbuskulär mykorrhizasvamp (AMF) inrymmer en mångfald av arter (Smith & Read, 2008; Evert & Eichhorn, 2013). Uppsatsen syftar inte till att reda ut hur olika arter skiljer sig. I några fall nämns skillnader mellan arter då det tydligt framhålls som en inverkan i studier som arbetet refererar till. Gällande inverkan av AM på växtupptag av föroreningar ges tungmetaller mer utrymme än organiska föroreningar, även om de sistnämnda också tas upp.

2. Metod och material

För att redogöra för de tre huvudsakliga komponenterna som arbetet innefattar (fosfor, mykorrhiza och restprodukter) har litteratur inom områdena marklära, växtfysiologi och mykorrhiza använts. Utöver detta har kompendier, myndighetsrapporter, översiktsartiklar, metaanalyser och vetenskapliga rapporter legat till grund för arbetet. För att hitta relevant information har sökmotorerna Web Of Science, Primo, Google och Google Scholar nyttjats. Utöver det har sakkunniga bidragit med litteraturtips och information om pågående studier.

3. Fosfor

Av de växtnäringsämnen som härstammar från jordskorpan är fosfor det ämne som oftast är begränsande för grödors tillväxt (Evert & Eichhorn, 2013; Elser et al., 2007; Ågren et al., 2012; Vitousek et al., 2010). Växttillgänglig fosfor är kritiskt för växter då det ingår i cellmembran och i de energibärande föreningarna ATP och ADP, samt utgör beståndsdelar i nukleinsyror och ett flertal koenzymer (Evert & Eichhorn, 2013; Eriksson et al., 2015; Söderhäll, 2011). Vid näringsbrist kan ämnet omfördelas mellan olika delar av växten (Evert & Eichhorn, 2013; Söderhäll, 2011). Äldre blad uppvisar därför ofta bristsymtom först, då fosfor i äldre blad kan användas för yngre blads utveckling (ibid). Vanliga bristsymtom är små och klena plantor, försämrad blomning, försenad fruktmognad, försämrad frökvalitet, ovanligt mörkgrönt färgade plantor samt plantor med röda/lila färgnyanser under växtens senare stadier (Evert & Eichhorn, 2013; Eriksson et al., 2015).

Till skillnad från kvävecykeln, vars tidsspann högst uppnår ett par århundraden, mäts fosforcykeln i årtusenden (Dawson & Hilton, 2011). Ämnet cirkulerar från växtlighet till djur för att sedan återvända till marken i organiska former (Evert & Eichhorn, 2013). Därefter görs fosfor åter växttillgänglig genom mikroorganismers nedbrytningsprocesser. En viss naturlig förlust sker genom utlakning och erosion. Denna förlust ersätts av vittrat berg. Den fosfor som gått förlorad deponeras tids nog i haven. Det är först genom större geologiska processer som deponerad fosfor åter kan bli tillgänglig för landlevande organismer (ibid).

Fosfor i växttillgänglig form förekommer generellt endast i låga koncentrationer i marken och är ofta ojämnt fördelad (Evert & Eichhorn, 2013, Söderhäll, 2011, Eriksson et al., 2015). Växttillgängligheten påverkas av faktorer som markens pH, dess mineralsammansättning och förekomst av organiskt material (Eriksson et al., 2015; Karunanithi et al., 2015; Menzies, 2009; Richardson et al., 2009). En betydande del av markens fosfor kan finnas bundet i organiska föreningar (Eriksson et al., 2015; Menzies, 2009). De oorganiska fosforformerna i marken utgörs av fosfater adsorberat till järn- och aluminiumoxider samt olika svårslösliga fällningar vars förekomst är beroende av pH och markens joninnehåll (Eriksson et al., 2015). Den fosfor som växters rötter tar upp förekommer huvudsakligen som divätefosfat (H_2PO_4^-) (Evert & Eichhorn, 2013; Eriksson et al., 2015; Karunanithi et al., 2015). Rötters utformning, deras förmåga att utsöndra exsudat samt mikroorganismers kolonisering av rhizosfären har en viktig roll att spela för näringsupptaget (Richardson et al., 2009).

3.1 Stundande global fosforbrist

Fosforcykeln har kommit att påverkas kraftigt av mänsklig aktivitet (Evert & Eichhorn, 2013). Bortförel av skördat växtmaterial, ökad utlakning och erosion gör att markers fosfordepåer minskar snabbare än fosfor hinner ersättas av vittrat berg. Ända sedan antiken har stallgödsel använts för att upprätthålla jordars bördighet (Eriksson et al., 2015). Fram till andra världskriget användes i Sverige huvudsakligen stallgödsel, humangödsel, benrester och slaggrester från stålindustrin för att kompensera jordbruksmarkers näringsförluster (Linderholm, 2011; Eriksson et al., 2015). Därefter kom nyttjandet av mineralgödsel att accelerera för att kunna möta en växande befolknings matbehov (Linderholm, 2011; Eriksson et al., 2015).

I mitten av 1970-talet nåddes en topp i Sverige gällande tillförel av fosformineralgödsel (Linderholm, 2011; Eriksson et al., 2015). Fosforförrådet i jordarna hade då hunnit byggas upp. I idag är rekommendationen att endast ersätta den fosfor som försvinner med skörden

så länge markens fosforhalter är tillräckliga (Linderholm, 2011). Stallgödsel utgör idag, liksom förr, en betydande källa till återförande av fosfor i Sverige. En viss del utgörs även av restprodukter från lantbruk, stad och industri. Mineralgödsel har fortfarande en viktig roll att spela när marken inte klarar att möta grödornas behov av växttillgänglig fosfor (ibid). Behovet av fosfortillförsel skiljer sig mellan olika delar av världen. I Afrika, söder om Sahara, är en stor del av den brukade marken idag väldigt fosforfattig. Markens fosforhalter behöver där höjas för att kunna försörja en växande befolkning (Selinus, 2011). I Sydamerika har den globala efterfrågan på djurfoder och bristen på stallgödsel gjort att mineralgödsel i stor utsträckning används för att täcka fosforbehovet vid produktion av fodergrödor (Tidåker, 2011).

Jordbrukets behov av fosfor i mineralgödsel form sträcker sig inte längre tillbaka än det senaste århundradet (Eriksson et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011). Världens råfosfatreserver är geografiskt ojämnt fördelat. De största tillgångarna finns i Marocko och Västsahara (Cooper et al. 2011; UGGS, 2018). Störst utvinning sker i Kina följt av USA, Marocko, Ryssland, Jordanien och Brasilien (UGGS, 2018). Även om tidsspannet varierar kraftigt mellan olika beräkningar så menar forskare att en global råfosfatbrist är ett problem som bör tas på allvar (Cordell & Rosemarin, 2011, Selinus, 2011; Dawson & Hilton, 2011), då det skulle kunna äventyra den globala matsäkerheten (Scholz & Wellmer, 2013; Cooper et al. 2011).

3.2. Fosfor i restprodukter

Recirkulering av fosforrika restprodukter anses kunna vara en viktig del i strävan mot en långsiktigt hållbar matproduktion (Dawson & Hilton, 2011; Fredriksson, 2011; Karunanithi et al., 2015). Experter belyser, utöver de sinande råfosfatreserverna, även de miljöproblem som ofta uppstår då fosforrikt avfall ackumuleras i naturen (Nesme & Withers, 2016). I akvatiska miljöer är algblomning, med syrebrist som följd, vanligt förekommande då fosforhalterna höjs (Nesme & Withers, 2016; Evert & Eichhorn, 2013; WWF, 2010; Karunanithi et al., 2015).

I Sverige finns stora mängder fosfor i restprodukter från gruvindustrin och i Östersjöns sediment (Naturvårdsverket, 2013). Apatitutvinning från gruvavfall anses kunna bli aktuellt i framtiden, men är en fråga om ekonomisk bärighet (Fredriksson, 2011). Det anses i dagsläget inte vara ett alternativ att utvinna fosfor ur Östersjöns sediment, då ämnet är väldigt spritt och därför svårt att ta tillvara på (Naturvårdsverket, 2013).

Det största interna flödet av fosfor inom svenskt jordbruk utgörs idag av stallgödsel (Salomon & Wivstad, 2013). Mineralgödsel står dock fortfarande för det största inflödet. Även om nästan all stallgödsel redan recirkuleras så förekommer stora regionala obalanser (Palm, 2011; Tidåker, 2011). Näring från stallgödsel ackumuleras i marker i områden med hög djurtätet, medan fosforunderskott samtidigt kan förekomma i marker i regioner där djurtätheten är låg (Tidåker, 2011).

Humangödsel utgör, näst efter stallgödsel, den största källan till potentiell fosforåterföring (Wivstad et al, 2009). Avloppsprodukter kan återföras genom spridning av avloppsslam, återföring av källsorterat toalettavfall och även genom kemiskt utvunnen fosfor ur avloppsprodukter (Kirchmann & Cohen, 2011; Kvarnström & Johansson, 2011). Källsorterat toalettavfall har väckt intresse då det kan möjliggöra fosforrecirkulering med låga halter

oönskade ämnen (Kvarnström & Johansson, 2011). Idag sker dock inte detta i någon större utsträckning, då investeringar först krävs för att anpassa toalettsystemen för ändamålet (Henze, 2011; Kvarnström & Johansson, 2011; Jönsson et al., 2013). Avloppsslam återförs idag i viss utsträckning i Sverige (Henze, 2011; Finnson, 2011).

En annan betydande fosforkälla utgörs av matavfall som antingen komposteras eller rötas innan spridning (Wivstad et al, 2009; Naturvårdsverket, 2013). Under senare år har intresset för biogasproduktion ökat vilket gjort att allt mer av matavfallet har kommit att rötas (Naturvårdsverket, 2013; Jordbruksverket, 2017). Biogas erhålls då organiskt avfall, såsom matavfall, slakteriavfall, stallgödsel och energigrödor, rötas under anaeroba förhållanden. Rötresten som erhålls (biogödsel) ses som ett fosforinnehållande fullgödselmedel (Palm, 2011; Naturvårdsverket, 2013). En större del av de erhållna rötresterna återförs idag till jordbruksmarker (Salomon & Wivstad, 2013; Palm, 2011).

Särskilt inom ekologisk odling utgör slakteriavfall, såsom kött- och benmjöl, en viktig fosforresurs (Naturvårdsverket, 2013; Linderholm, 2012). Den inhemska råvaran för framställning av dessa produkter går idag på export vilket gör att ekologiska odlare importerar kött- och benmjöl från utlandet (Naturvårdsverket, 2013; Linderholm, 2012). I Sverige har benmjöl lång historia som gödselmedel (Eriksson et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011).

Ursprungsbefolkningar i Amazonas regnskogar nyttjade tidigt biokol som jordförbättringsmedel (Glaser, 2006). I nutid har biokol fått uppmärksamhet som ett sätt där fosfor kan tillvaratagas genom pyrolys av organiska restprodukter (Ekobalans, u.å.b; Carlsson, 2016). En fördel är att det kan möjliggöra fosforprodukter med låga föroreningshalter. Samtidigt kan biokol fungera som kolsänka för atmosfärisk CO₂ (Lehmann et al., 2006).

Teknologier för att extrahera koncentrerade fosfatföreningar ur avfall har fått uppmärksamhet på senare tid (Kirchmann & Cohen, 2011; Karunanithi et al. 2015; Tideström, 2011). Den fosforrika föreningen struvit (NH₄MgPO₄·6H₂O) utvinns idag kommersiellt runt om i världen (Ekobalans, u.å.a; Multifarm Harvest, 2015; Ostara, 2017; Paques, u.å.). En annan metod är att framställa ammoniumfosfat ur förbrända restprodukter (Kirchmann & Cohen, 2011; Tideström, 2011). Båda dessa metoder ger fosfor i koncentrerad form med låga halter av föroreningar.

4. Mykorrhiza

Ordet mykorrhiza betyder svamprot, vilket syftar på den vanligt förekommande symbiotiska relation mellan vissa grupper av svampar och växters rötter (Widén & Widén, 2008; Smith & Read, 2008; Evert & Eichhorn, 2013). Mykorrhizasvampar hör till mångfalden av mikroorganismer som koloniserar markens rhizosfär (Smith & Read, 2008). Denna typ av symbios beräknas förekomma hos minst 90% av alla kärlväxter (Evert & Eichhorn, 2013).

Mykorrhiza delas upp i ett antal olika undergrupper där *arbuskulär mykorrhiza* (AM) utgör den mest vanligt förekommande. Arbuskulär mykorrhiza är den grupp med störst betydelse för jordbruket (Malbreil et al., 2014). Gruppen *ektomykorrhiza* (ECM) återfinns hos ett flertal svenska trädarter såsom gran, tall, bok och ek och har stor betydelse i många skogsekosystem (Smith & Read, 2008; Widén & Widén, 2008). Förutom dessa två grupper delas mykorrhiza in i grupperna *ektendomykorrhiza*, *arbutoid mykorrhiza*, *monotropoid mykorrhiza*, *ericoid mykorrhiza* samt *orkidémykorrhiza* (Smith & Read, 2008).

Grupperna skiljer sig gällande vilka svamp- och växtarter som ingår i symbioserna, på vilket sätt symbionterna är sammanvuxna och hur de påverkar varandra (Smith & Read, 2008). Förenande för de olika typerna är hyfernas roll gällande att förse växter med näringsämnen från marken. Svampen är, med få undantag, helt beroende av växtens leverans av kolhydrater. Detta kan ge mykorrhizasvampar en konkurrensfördel gentemot andra marklevande svampar, då markens kolinnehåll ofta är en begränsande resurs (ibid).

4.1 Arbuskulär mykorrhiza

Arbuskulär mykorrhiza (AM) förekommer hos ungefär 80% av alla landlevande kärlväxter (Evert & Eichhorn, 2013; Smith & Read, 2008). De arbuskulära mykorrhizasvampar (AMF) som ingår i dessa symbioser tillhör klassen Glomeromycetes (Evert & Eichhorn, 2013; Smith & Read, 2008). I dagsläget finns över 200 beskrivna arter (Krüger et al., 2012; Smith & Read, 2008). Denna typ av symbios är mindre artspecifik jämfört med ektomykorrhiza (Evert & Eichhorn, 2013).

Studier av fossila tidigt landlevande växter har visat att mykorrhiza var vanligt förekommande redan för miljontals år sedan (Evert & Eichhorn, 2013; Widén & Widén, 2008; Smith & Read, 2008). AM-liknande symbioser anses ha varit viktiga för växters kolonisering av land (Smith & Read, 2008). Svampens hyfer tros ha varit kritiska för deras näringsupptag på de då dåligt utvecklade jordarna (Evert & Eichhorn, 2013). AM-symbioser återfinns idag i vitt skilda ekosystem hos arter inom samtliga landlevande växtfylum (Smith & Read, 2008).

Växter koloniserar genom att AM-svampars hyfer penetrerar rötters kortexceller (Evert & Eichhorn, 2013). Inuti cellerna utvecklas förgrenade buskliknande hyfnystan, s.k. arbuskler. Genom dessa sker sedan utbytet av växtens metaboliter och svampens näringsämnen. Många AM-svampar bildar även näringslagrande svullnader mellan rötternas celler, s.k. vesiklar (Evert & Eichhorn, 2013; Smith & Read, 2008). Tidigare kallades arbuskulär mykorrhiza för vesikulär-arbuskulär mykorrhiza (VAM) (Smith & Read, 2008). Numera kallas dock symbiosen endast för arbuskulär mykorrhiza, då vesiklar inte alltid förekommer.

Den koloniserade växtens näringsupptag gynnas av svampens mycel som ofta sträcker sig flera centimeter ut från roten i den omgivande jorden (Smith & Read, 2008). Utöver att förse växter med näring så kan symbiosen även bidra till ökad tolerans mot vattenstress, skydd

mot patogener samt begränsa växters upptag av tungmetaller (Evert & Eichhorn, 2013; Smith & Read, 2008). Svampen sprids genom sporer, rotfragment och hyfer (Smith & Read, 2008). Idag produceras AM-inokulum i kommersiell skala för användning inom växtproduktion (Gianinazzi & Vosatka, 2004).

4.2. Arbuskulär mykorrhiza och fosfor

Eftersom markens fosfor vanligen förekommer i former med låg löslighet och rörlighet behöver växten ofta tillgång till stora jordvolymen för att tillgodose sitt fosforbehov (Evert & Eichhorn, 2013). I symbios med AM sträcker sig svampens hyfer utanför växtrötters upptagningszoner vilket gör att åtkomst av näringsämnet blir mycket större (Evert & Eichhorn, 2013; Smith & Read, 2008). Dessutom har hyfer förmåga att penetrera porer i marken som är för små för växtrötter (Smith & Read, 2008). Växter som koloniserats av arbuskulär mykorrhizasvamp kan konkurrera effektivt med markens mikroorganismer om nyligen frigjorda näringsämnen (ibid). Vissa studier tyder på att mykorrhizahyfer i viss mån kan hydrolisera organiskt bunden fosfor genom utsöndring av fosfatas (Joner, van Aarle et al., 2000; Koide & Kabir, 2000). AMF kan inverka gynnsamt på förekomst av fosfatupplösande bakterier (PSB), som frigör oorganiska fosforformer (Yousefi et al., 2011; Widada, 2003; Ordoñez et al., 2016). Vid förhöjda fosforhalter kan arbuskulär mykorrhizasvamp komma att missgynnas, men olika arter har visat sig vara olika toleranta (Nagahashi et al., 1996; Douds & Schenck, 1990).

5. Restprodukter, arbuskulär mykorrhiza och fosforupptag

Tillförsel av restprodukter påverkar markers näringskoncentrationer och i vilka former som ämnena förekommer (Wivstad et al., 2009; Kirchmann & Cohen, 2011; Gollner et al., 2011; Warnock et al., 2007; Ishii & Kadoya, 1994; Wentzel & Joergensen, 2016). Även andra markegenskaper såsom markstruktur, mullhalt och pH kan komma att påverkas i olika utsträckning. Nedan redogörs för ett antal studier gällande effekten av olika fosforinnehållande restprodukter på förekomst av arbuskulär mykorrhiza och hur det i sin tur påverkar grödors fosforupptag och tillväxt.

5.1 Avloppsslam:

Kersti Linderholm (2012) redogör för en fältstudie i västra mellersta Sverige där effekten av olika gödselmedel jämfördes vid odling av korn (*Hordeum vulgare* L.). Försöket pågick under tre år. Det låg till grund för ett efterföljande växthusförsök där förekomst av arbuskulär mykorrhiza studerades vid användning av jord som hämtats från fältförsökets behandlingar. De gödselprodukter som ingick utgjordes av tre olika typer av avloppsslam där fosfor fällts ut med antingen järnklorid, aluminiumbaserade kemikalier eller släckt kalk, ett biologiskt slam från massa- och pappersindustrin, en aska av förbränt biologiskt slam samt även mineralgödsel. Försöksytorna tillfördes respektive gödselprodukt för att täcka tre års skörde bortförsel av fosfor (45 kg fosfor/ha). Ingen ytterligare fosfor tillfördes år två och tre.

I de behandlingar där slam användes var första årets avkastning signifikant lägre jämfört med då aska eller mineralgödsel istället tillfördes (Linderholm, 2012). Grödorna i slambehandlingarna visade dessutom tecken på fosforbrist. Linderholm (2012) menar att det kan ha berott på hämmad fosfor mineralisering till följd av låg nederbörd. Då istället mineralgödsel användes förekom fosfor i lättlöslig form. Att tillförsel av aska resulterade i hög avkastning tros ha berott på askans kalkande effekt. År två och tre fanns inga signifikanta skillnader i avkastning mellan de olika behandlingarna. Andra årets avkastning ansågs vara normal i samtliga fall. Året därpå var avkastningen mycket högre i samtliga behandlingar jämfört med en för regionen genomsnittlig skörd. Linderholm (2012) menar att det i det långa loppet och under gynnsamma väderförhållanden är mer viktigt att upprätthålla markens fosforförråd än i vilken form som ämnet tillförs. I det korta tidsperspektivet och under torra förhållanden kan dock tillförsel av lättlöslig fosfor vara kritiskt för att säkra god avkastning.

Ett år efter det avslutade fältförsöket samlades jord in från de ytor där avloppsslam med järnutfälld fosfor tillförts, ytorna där biologiskt slam tillförts, de ytor där mineralgödsel tillförts samt även från fältförsökets ogödslade kontroll (Linderholm, 2012). Våren därpå genomfördes ett växthusförsök för att studera de inslamlade substratens påverkan på förekomst av arbuskulär mykorrhiza (AM). Som värdväxt användes italienskt rajgräs (*Lolium multiflorum* cv. Barspectra) odlad i kruka. I försöket fanns två uppsättningar där den ena tillfördes ytterligare fosfor i form av mineralgödsel (motsvarande 15 kg/ha). Samma mängd kväve och kalium tillfördes samtliga krukor för att möta växternas behov. I försöket erhöles högst värden gällande rotlängd och koloniserad rotlängd i fallen med avloppsslam. AM-kolonisering förekom i samtliga behandlingar i varierande utsträckning, utom i fallet med substrat från fältförsökets mineralgödslade ytor som tillförts ytterligare fosfor under växthusstudien.

Linderholm (2012) redogör för ytterligare en studie gällande fosfor och förekomst av

arbuskulär mykorrhiza. Vall odlades under tre år på ett fält i västra mellersta Sverige. Försökets olika behandlingar utgjordes i detta fall av tillfört avloppsslam med järnutfäld fosfor (motsvarande 94 kg P/ha och 110 kg Tot-N/ha), tillförd mineralgödsel (motsvarande 60 kg N/ha och 45 kg K/ha), samt en ogödslad kontroll. Fosfor tillfördes alltså endast i fallet med avloppsslam. Samtliga behandlingar utom den ogödslade kontrollen gödslades med kväve och kalium för att möta grödornas behov. Rotprover analyserades i slutet av tredje växtsäsongen. Jord från fältförsökets behandlingar användes sedan i ett växthusförsök där italienskt rajgräs (*Lolium multiflorum*) odlades i kruka. Fält- och krukförsöket visade inga signifikanta skillnader sinsemellan gällande grad av mykorrhizakolonisering. I fallet med avloppsslam kunde god avkastning erhållas samtidigt som förekomst av AM inte påverkades negativt.

Mackaya et al. (2017) utförde ett krukförsök med syfte att studera växtrötters och AM-hyfers fosforupptag. Fosforkällorna som ingick i studien utgjordes av torkat avloppsslam, aska från förbränt avloppsslam samt mineralgödsel. I försöket användes specialutformade odlingskärl som bestod av en inre och en yttre cylinder. I den inre cylindern såddes vete (*Triticum aestivum* L.) in, antingen med eller utan mykorrhizainokulum (*Rhizophagus irregularis*). Den inre cylinderns fosforkälla utgjordes av den radioaktiva isotopen ³³P, vilket gjorde att upptaget av denna kunde särskiljas från upptaget av den yttre cylinderns fosfor. I den yttre cylindern förekom fosfor i de former som försökets syfte var att jämföra. Växtens fosforupptag från den yttre cylindern begränsades av nät mellan de två cylindrarna. I försöket förekom två olika maskstorlekar där näten antingen tillät både rötter och AM-hyfer att växa igenom (700 µm) eller enbart tillät AM-hyfers genomväxt (25 µm). Fosforupptaget från AM-hyfer, mykorrhizakoloniserade rötter och okoloniserade rötter kunde därför jämföras.

I de behandlingar där fosforkällan utgjordes av lättillgänglig P (mineralgödsel) var förekomsten av AM-hyfer låg (Mackaya et al., 2017). Detta skilde sig från de behandlingar där avloppsslam eller aska istället ingick. Studien kunde visa att AM-hyfer tog upp fosfor ur torkat avloppsslam. Däremot var bevisen svaga för det samma i fallet med aska. I fallet med avloppsslam så hade okoloniserade rötter samma förmåga att ta upp P som ensamma AM-hyfer hade. Koloniserade rötter (rötter+hyfer) tog däremot upp signifikant mer fosfor jämfört med enbart rötter eller enbart AM-hyfer. Även om hyfers fosforupptag ofta anses vara mer effektiv än växtrötters upptag, då hyfer kan komma åt mikroutrymmen i marken som begränsar rötters åtkomst (Jakobsen et al., 1992; Tibbett, 2000) så var detta inte fallet i studien (Mackaya et al., 2017). Det tros ha berott på vetets förmåga att utveckla stora mängder finrötter. Olika AMF-arter kan också skilja sig gällande förmåga att ta upp P (Mackaya et al., 2017; Smith et al., 2004).

I det torkade avloppsslammets var andelen lättextraherbar fosfor 6,84%, medan askans lättextraherbara P bara var 0,54%. Avloppsslammets fosfor förekom dessutom, till skillnad från i askan, antagligen till viss del i organiska former. Studier har visat att AMF kan gynna markens fosformineraliserande mikroliv (Ye et al, 2015; Zhang et al., 2016; Marschner et al., 2001; Wamberg et al., 2003). Mackaya et al. (2007) lyfter även fram en studie som tyder på att AMF kan hydrolysera organiskt bunden P (Koide & Kabir, 2000). I fallet med aska måste den oorganiskt bundna fosfor först lösas upp innan den blir växttillgänglig. Studier finns som visar att AMF kan gynna förekomst av fosfatupplösande bakterier (PSB) (Ordoñez et al., 2016). Försökstiden var dock antagligen för kort för att oorganisk fosfor skulle hinna bli

växttillgänglig (Mackaya et al., 2017). Slutsatsen drogs att recirkulering av avloppsslam kan vara ett sätt att sluta de antropogena fosforkretsloppen, då det kan främja AM-kolonisering och därför gynna växters fosforupptag (Mackaya et al., 2017).

Seleiman et al. (2013) utförde ett växthusförsök där behandlingarnas näringskällor utgjordes av avloppsslam, rötat slam eller mineralgödsel (28–3–5). De grödor som ingick i försöket var majs (*Zea mays* L.), industrihampa (*Cannabis sativa* L.) och rybs (*Brassica napus* L. ssp. oleifera). Grödorna planterades i krukor med antingen sandhaltig jord eller sand blandat med ogödslad torv. De olika gödselprodukterna tillfördes i en mängd motsvarande 120 kg N/ha för majs, 60kg N/ha i fallet med industrihampa och 90kg N/ha i de behandlingar där rybs ingick.

I samtliga behandlingar var fosforkoncentrationen i grödornas ovanjordiska biomassa högst i de fall där avloppsslam tillförts det sandighaltiga odlingssubstratet (Seleiman et al., 2013). Oavsett odlingssubstrat var antalet sporer av mykorrhizabildande svamp 30-40% högre i alla grödor där avloppsslam tillförts jämfört med de behandlingar där mineralgödsel istället tillförts. Studien visade att avloppsslam ledde till högre antal mykorrhizasporer och högre grad av mykorrhizakolonisering jämfört med tillförsel av mineralgödsel. Seleiman et al. (2013) drog slutsatsen att gödsling med avloppsslam kan vara ett bra sätt att recirkulera organiskt avfall, då det kan gynna god avkastning och förekomst av arbuskulär mykorrhiza, minska beroendet av handelsgödsel samt även ha jordförbättrande egenskaper.

5.2 Biogödsel (rötrest från biogasproduktion):

Wentzel & Joergensen (2016) utförde ett 70-dagars växthusförsök med krukodlad italienskt rajgräs (*Lolium multiflorum* Lam.). I studien undersöktes avkastning, kväveupptag och påverkan på olika grupper av mikroorganismer vid tillförsel av antingen rötrest (biogödsel) eller flytgödsel. Rötresternas råvaror kom från sex olika biodynamiska gårdar i Baden Württemberg, Tyskland. Avfallet rötades under anaeroba förhållanden i tre olika biogasanläggningar. De tre rötresterna som ingick i studien bestod av (1) 95% naturgödsel och 5% ensilage, (2) 71% naturgödsel och 29% ensilage och (3) 57% naturgödsel och 43% ensilage. I tredje fallet skildes vätskan från den fasta fraktionen och endast vätskan ingick i försöket. De flytgödsel som ingick bestod av avföring, urin och halm från djurhållning. Utöver de sammanlagt sex olika gödselprodukterna ingick även en ogödslad kontroll. Rötresterna och flytgödsel tillfördes i en mängd motsvarande 120 kg N/ha.

I de behandlingar där rötrest tillförts var växternas ovanjordiska biomassa i snitt 66% högre jämfört med den ogödslade kontrollen (Wentzel & Joergensen, 2016). Kväveupptaget var i snitt 166% högre. Flytgödsel ökade biomassan med 35% och kväveupptaget med 65%. Avkastningen visade sig korrelera positivt med hur mycket av substratets kväve som utgjordes av NH₄-N (ammonium). Både tillförsel av rötrest och flytgödsel minskade aminosockerhalterna i analyserade rotprover, vilket indikerar lägre grad av mykorrhizakolonisering. I fallet med tillförsel av rötrest var förekomsten av saprofytisk svamp lägre, vilket inte var fallet då flytgödsel istället använts. Detta kunde påvisas genom bestämning av ergosterol-koncentrationer, som förekommer i saprofytisk svamp, men inte i AMF. Wentzel & Joergensen (2016) menar att den negativa påverkan på mykorrhizakolonisering kan ha orsakats av förhöjda koncentrationer växttillgänglig näring.

SLU-forskaren Georg Carlsson genomförde ett växthusförsök där kvävefixerande blålucern (*Medicago sativa* L.) och hundäxing (*Dactylis glomerata* L.) odlades antingen tillsammans eller ensamt, med eller utan tillförsel av rötrest (Georg Carlsson, pers.medd.). Vid tillförsel av rötrest ökade biomassan hos hundäxing då den fått växa ensamt, men förekomst av AMF visade sig minska hos båda grödorna i samtliga behandlingar med rötrest (samodling eller odling var för sig). Studien indikerade att tillförsel av rötrest hade en handelsgödselsliknande effekt (Georg Carlsson, pers.medd.). Vidare tydde även försöket på att mykorrhizasymbioser hos blålucern är mer känslig för tillförsel av höga halter växttillgänglig näring än vad de kvävefixerande symbioserna är.

5.3 Biokol:

Warnock et al. (2007) lyfter fram fyra olika mekanismer som kan påverka mykorrhizasvamp i närvaro av biokol: (1) biokolens påverkan på markens fysiokemiska egenskaper, (2) biokolens påverkan på mikrober som i sin tur påverkar förekomst av mykorrhiza, (3) biokolens påverkan på tillgängligheten av AM-signalämnen och allelokemikalier (4) biokolens förmåga att genom dess porstruktur skydda AM-hyfer mot svampätande organismer.

I Japan, där biokol länge använts har tidiga pionjärstudier gällande biokol och arbuskulär mykorrhiza (AM) utförts (Warnock et al., 2007; Ishii & Kadoya 1994). Ishii & Kadoya (1994) undersökte effekten av biokol på förekomst av AM i en japansk citrusodling (*Citrus unshiu*). I studien användes olika typer av biokol tillsammans med AM-inokulum (*Glomus fasciculatum*). Biokol gynnade fruktträdens tillväxt och även förekomst av AM. Ishii & Kadoya (1994) menar att den koloniseringsgynnande effekten kan ha berott på biokolens förmåga att adsorbera mykorrhizahämmande ämnen såsom olika typer av agrokemikalier. Även biokolens förmåga att höja markens pH tros ha inverkat positivt.

Biederman & Harpole (2013) genomförde en metaanalys där 371 oberoende studier ingick. Studien visade att användning av biokol generellt gynnar hög avkastning, ökad mikrobiell biomassa, ökad rhizobiumkolonisering, högre koncentration av kalium i växtvävnader samt högre halter N, P, K och C i marken, oavsett jordmån och klimat. Det kunde även påvisas att biokol generellt höjer markens pH. I metastudien konstaterades ingen signifikant gynnande effekt av biokolens inverkan på AM-kolonisering. Resultaten mellan de inkluderade studierna varierade dock. Biederman & Harpole (2013) menar att en tänkbar anledning, i de fall då biokol haft neutral eller negativ inverkan, kan ha varit ökade koncentrationer av växttillgängligt P. En annan tänkbar inverkan kan ha varit biokolens adsorberande förmåga gällande signalämnen som styr AM-kolonisering (Biederman & Harpole, 2013; Akiyama et al., 2005; Warnock et al., 2007).

Hammer et al (2014) genomförde flera in-vitroförsök där två typer av biokol användes tillsammans med AM-svampen *Rhizophagus irregularis*. Den ena typen av biokol var framställd ur trä och var näringsfattig med pH 7,6, 85% C, 0,1% N och 0,15% P. Den andra typen var framställd ur hönsgödsel och var därför näringsrik med pH 10,8, 37% C, 2,5% N och 0,5% P. Halterna av aska skilde sig även mellan de två biokolerna, där den förstnämnda hade låg askhalt och den sistnämndas askhalt var hög. I försöken förekom AM-svampen tillsammans med steriliserade rötter av morot (*Daucus carota* L.).

Med svepelektronmikroskop kunde Hammer et al. (2014) visa att AMF-hyfer växte både utanpå och inuti båda typerna av biokol trots deras olika beskaffenheter gällande näringshalter, pH och struktur. I ett av försöken laddades näringsfattig biokol med radioaktiv fosfor (^{33}P). I ena fallet begränsades hyfernas direkta kontakt med biokolet med hjälp av ett finmaskigt nät. Hyferna hade i det andra fallet istället fritt tillträde till biokolet. Det gjorde att de kunde växa in i biokolens porer - även porer vars storlek begränsade växters rötter (<10 μm).

Det visade sig att hyferna transporterade sex gånger mer fosfor till växrötterna när hyferna hade fritt tillträde till biokolen jämfört med då hyfernas åtkomst begränsades av nät (Hammer et al., 2014). Hammer et al. (2014) menar att resultatet kan ha berott på att hyfer kan ta upp lösta P-joner från biokolets mikroporer som annars hinner bindas till biokolet igen innan de når ut till markvätskan. Ur studierna drogs slutsatsen att det kan vara fördelaktigt med framställning av biokol som optimeras gällande näringsinnehåll och adsorptionsförmåga genom att anpassa använda val av råvaror, pyrolystemperaturer och processeringstider (Hammer et al., 2014; Morales et al., 2013; Yao et al., 2013).

5.4 Struvit:

Heydari & Maleki (2014) utförde ett fältförsök vid Henfaes Research Center i Wales där fosforupptaget undersöktes hos korn (*Hordeum vulgare* L.) vid tillförsel av struvit, råfosfat eller trippelsuperfosfat. I studien undersöktes också effekterna av inokulering av AMF och de tillförda näringsprodukterna. Trippelsuperfosfat betraktades i försöket som löslig, råfosfat som svårlöslig och struvit som ett mellanting. Studien var förlagd på en sandig lerjord med låg fosforhalt. Grödan såddes in i mitten av maj 2010 och skördades 22 augusti. Försöket kunde visa att AMF-inokulering bidrog till ett signifikant ökat fosforupptag, ökade fosforkoncentrationer i grödornas biomassa samt även ökad avkastning oavsett vilken fosforprodukt som tillfördes. Grödornas biomassa innehöll högst fosforkoncentrationer då AMF inokulerats och antingen struvit eller trippelsuperfosfat tillförts.

Rotprover färgades och studerades i mikroskop för att undersöka hur rötternas mykorrhizakolonisering påverkats av de olika fosforprodukterna (Heydari & Maleki, 2014). I fallet med AMF-inokulum och svårlösligt råfosfat erhöles högst grad av mykorrhizakolonisering. Tillförsel av struvit resulterade i högre grad av mykorrhizakolonisering jämfört med då trippelsuperfosfat istället användes. Heydari & Maleki (2014) drog slutsatsen att AMF-inokulering kan ge både ekonomiska och miljömässiga vinster genom att möjliggöra minskad gödselanvändning samtidigt som en tillfredsställande avkastning kan erhållas.

Van Geel et al. (2016) utförde ett treårigt fältförsök i Belgien där effekten av olika typer och mängder av fosforgödselmedel på diversiteten hos arbuskulära mykorrhizasamhällen undersöktes. Studien var förlagd i en äppelodling. Tillförsel av snabbverkande gödsel i två olika mängder (motsvarande 20 resp. 50 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$) och tre långsamverkande gödselmedel champinjonkompost (motsvarande 28 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$), grönkompost (motsvarande 30 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$) samt struvit (motsvarande 20 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$) ingick.

Rot- och jordprover samlades in under försökets tredje år (Van Geel et al., 2016). De olika fosforprodukterna resulterade inte i skillnader gällande markens pH, nitrat- och ammoniumkoncentrationer. Skillnader fanns dock gällande markens halter av fosfat och

organiskt material. De två snabbverkande gödselmedlen gav högst fosfatkoncentrationer i marken, medan fosfatkoncentrationerna var likvärdiga sinsemellan i fallen med de långsamverkande gödselprodukterna.

DNA-sekvensering tillämpades för att undersöka antalet olika AMF-taxa i proverna, samt i vilka mängder dessa förekom (Van Geel et al., 2016). Sammanlagt 72% av AMF-arterna i behandlingarna tillhörde familjen Glomeraceae, 26% tillhörde Claroideoglomeraceae och 2% tillhörde Paraglomeraceae. Signifikant högre AMF-diversitet förekom i behandlingarna med långsamverkande gödsel jämfört med tillförsel av snabbverkande gödsel. Då struvit använts erhöles högst antal skilda AMF-taxa.

Höga koncentrationer av växttillgänglig fosfor korrelerade negativt med AMF-artrikedom (Van Geel et al., 2016). Van Geel et al. (2016) menar att det råder konsensus om att fosfor är det näringsämne som i högst utsträckning påverkar markens AMF-samhällen. Tidigare studier har visat att växter ofta fördelar resurser till de växtdelar som sörjer för den mest begränsade resursen (Johnson 2010; Johnson et al. 2013). Vid ökad förekomst av växttillgänglig fosfor i marken kan därför växtens resurser fördelas till skott och bladverk istället för till rötter. Begränsad mängd exsuderade kolhydrater kan leda till ökad konkurrens mellan mykorrhizasvampar (Van Geel et al., 2016). De AM-arter som är bäst på att konkurrera i närvaro av förhöjda halter av växttillgänglig P i marken kommer i högre utsträckning att gynnas (Van Geel et al., 2016; Werner & Kiers, 2014). Vissa arter som gynnas av sådana förhållanden har visat sig kunna inverka negativt på värdväxtens tillväxt.

Van Geel et al. (2016) drog slutsatsen att långsamverkande gödselmedel kan gynna AMF-diversitet, medan snabbverkande gödselmedel tvärtom kan göra att AMF-diversiteten sjunker. Det kan leda till att AMF-samhällena domineras av arter som är mindre gynnsamma för värdväxtens tillväxt. Van Geel et al. (2016) konstaterar att struvit kan vara ett lämpligt fosforgödselmedel.

5.5 Benmjöl:

Vestberg (1992) genomförde växthusförsök där påverkan på krukodlad jordgubbe (*Fragaria x ananassa* Duch.) och majs (*Zea mays* L.) undersöktes vid AM-inokulering (*Glomus mosseae*) och tillförsel av olika gödselmedel i olika mängder. De gödselmedel som användes var benmjöl och två olika handelsgödsel (fast och flytande). Odlingssubstraten utgjordes av två olika typer av gödslad torv, ogödslad torv, vermikulit och sand i olika blandningar. Inokulumet framställdes genom att odla AM-svamp tillsammans med majsrötter under 4 månader i sand med lågt fosforinnehåll. I studien tillfördes 1 ml inokulum till krukornas planteringshål.

Hos både jordgubbe och majs gynnades antal AM-sporer då grödorna fick växa i sand som gödslats med benmjöl (Vestberg, 1992). Grödornas tillväxt var högre då mineralgödsel tillförts, men mineralgödsel resulterade i hämmad mykorrhizakolonisering. Vestberg (1992) drog slutsatsen att en avvägning gällande näringskoncentrationer bör göras för att både kunna erhålla grödor med tillfredställande storlek och hög grad av AM-kolonisering.

Kahiluoto & Vestberg (1998) utförde en växthusstudie vid Agricultural Research Center of Finland. Krukodlad purjolök (*Allium porrum* L.) tillfördes fosfor i form av Kolaapatit eller benmjöl. Grödans fosforupptag och fosforprodukternas påverkan på förekomst av arbuskulär

mykorrhiza undersöktes. De faktorer som skilde sig mellan behandlingarna var: tillsatt kvävemängd (0 mg/l, 266 mg/l eller 465 mg/l), val av fosforkälla (Kolaapatit eller benmjöl), tillsatt mängd fosfor (0 mg/l, 296 mg/l eller 392 mg/l), AM-inokulering eller ej, samt vilken art som inokulerades (*Glomus mosseae* eller *G. hoi*). Odlingssubstratet hämtades från fält och förekom i antingen osteriliserad eller delvis steriliserad form. Genom att delvis sterilisera substratet minskades mängden naturligt förekommande AM, samtidigt som andra viktiga mikrobiologiska processer fortfarande kunde fortgå. Försöket möjliggjorde att effekten av naturligt förekommande AM, inokulerad AM samt låg förekomst av AM kunde jämföras.

Skördens torrsvikt och grödornas fosforupptag gynnades i de behandlingar där benmjöl tillförts (Kahiluoto & Vestberg, 1998). Detta gällde även då AMF inte inokulerats vid användning av osteriliserat substrat. Då det delvis steriliserade substratet användes erhöles dock en negativ effekt. Kahiluoto & Vestberg (1998) kunde på så vis dra slutsatsen att naturligt förekommande AMF var lika effektiv som inokulerad AMF gällande fosforupptag från benmjöl. Vid förekomst av AM ökade det genomsnittliga fosforupptaget från benmjöl med 62%. Kahiluoto & Vestberg (1998) menar att det ökade upptaget kan ha berott på AM-hyfers förmåga att komma tätt intill platser där fosformineralisering sker (Dighton, 1991; Joner & Jakobsen, 1994). När det gäller hyfers påverkan på fosformineralisering genom utsöndring av exsudat menar Kahiluoto & Vestberg (1998) att betydelsen är tvetydig, då olika slutsatser dragits i olika studier (Dodd et al., 1987; Tarafdar & Marschner, 1994a, 1994b; Joner & Jakobsen, 1995; Joner et al., 1995).

Närvaro av AM ledde inte till signifikant ökat fosforupptag då näringskällan istället utgjordes av Kolaapatit (Kahiluoto & Vestberg, 1998). Kolaapatit ökade heller inte substratets fosforkoncentration jämfört med den ogödslade kontrollen. AM har tidigare visats kunna öka fosforupptag från olika slags råfosfat (Cabala-Rosand & Wild, 1982; Fabig et al., 1989; Manjunath et al., 1989). Att så inte var fallet vid användning av Kolaapatit berodde troligen på dess innehåll av mer svårslöslig fosfor (Kahiluoto & Vestberg, 1998; Fabig et al., 1988). Kahiluoto & Vestberg (1998) menar att benmjöl tillsammans med AM är ett bra sätt att recirkulera fosfor i strävan mot ett mer hållbart jordbruk.

5.6 Stallgödsel

Gollner et al. (2011) utförde ett försök i en långtidsstudie utanför Wien. Råg (*Secale cereale* L.) hade odlats på samma fält sedan 1906 för att utröna ifall tillförsel av lättlöslig handelsgödsel skulle kunna ersätta stallgödsel och växelbruk. Regionen karakteriseras av varma somrar med låg nederbörd. Fältet var indelat i fyra avlånga ytor (å 1000 m²). Tre av ytorna odlades med växelbruk (träda, vinterråg, vårkorn), medan råg kontinuerligt odlades i den fjärde (utan växelbruk). Varje yta var i sin tur indelad i tre mindre ytor där en gödslades med NPK, en med stallgödsel och en förblev ogödslad. Mängden näring som tillförts med NPK och stallgödsel motsvarade varandra. Studien som Gollner et al. (2011) utförde syftade till att undersöka hur de olika behandlingarna påverkade mullhalt, förekomst av arbuskulär mykorrhiza, markens näringshalter samt skördeutbyte.

Jordprover visade att markens ammonium- och nitratkoncentrationer var likvärdiga i de behandlingar där stallgödsel eller mineralgödsel tillförts (Gollner et al., 2011). Tillförsel av stallgödsel hade ökat mullhalten och magnesiumkoncentrationen med 96% resp. 78% jämfört med den ogödslade kontrollen. I fallet med NPK var ökningen 42% resp. 70%. Fosfor- och kaliumkoncentrationerna visade sig ha ökat med 166% resp. 167% då

stallgödsel tillförts och 136% resp. 137% i fallet med NPK. Koloniseringsgraden, förekomst av arbuskler, samt hyflängd var högst i den ogödslade kontrollen där fosforkoncentrationen var lägst. Den genomsnittliga minskningen för de tre observerade värdena jämfört med den ogödslade kontrollen var -32%, -17% och -16% då stallgödsel tillförts. I fallet med NPK var minskningen -58%, -26% och -38%.

Då markens koncentration av växttillgänglig fosfor inte skilde sig mellan tillförsel av NPK och stallgödsel kunde inte förhöjda fosforkoncentrationer förklara den lägre förekomsten av mykorrhiza vid tillförsel av NPK jämfört med stallgödsel (Gollner et al., 2011). Gollner et al. (2011) menar istället att tillförsel av stallgödsel hade haft en skonande effekt på förekomst av arbuskulär mykorrhiza genom: (1) högre mullhalt, vilket kan gynna AM-svampens överlevnad under år av träda, (2) markens förbättrade biologiska, fysiska och kemiska egenskaper, vilket kan påverka mykorrhizagynnande mikroorganismer positivt, (3) bättre jordstruktur och vattenhållande förmåga.

Den genomsnittliga avkastningen från 1960 till 2000 var högst i fallet med NPK (3630 kg/ha) och lägst i den ogödslade kontrollen (2266 kg/ha) (Gollner et al., 2011). I fallet med stallgödsel var avkastningen 3197 kg/ha. Avkastningen hade ökat i samtliga behandlingar under den tid som studien täckte. Det tros ha berott på byte till en modern rågsort samt ökad atmosfärisk deponering av kväve. Gollner et al. (2011) drog slutsatsen att tillförsel av stallgödsel är ett bra alternativ, särskilt i resurssnåla odlingssystem, i regioner där nederbörden är låg. Stallgödsel resulterade i hög mullhalt och högre förekomst av arbuskulär mykorrhiza än i fallet med mineralgödsel. Eftersom arbuskulär mykorrhiza har visat sig kunna öka grödors näringsupptag och resistens mot torra kan det bidra till hållbara och skördestabla odlingssystem.

6. Restprodukter, arbuskulär mykorrhiza och förekomst av oönskade ämnen

På uppdrag av svenska regeringen har miljömålsrådet tagit fram olika miljöförbättrande mål varav *giffri miljö* är ett av dem (miljömål.se, 2018; miljömål.se, 2017). Regeringens definition lyder: "*Förekomsten av ämnen i miljön som har skapats i eller utvunnits av samhället ska inte hota människors hälsa eller den biologiska mångfalden. Halterna av naturfrämmande ämnen är nära noll och deras påverkan på människors hälsa och ekosystemen är försumbar. Halterna av naturligt förekommande ämnen är nära bakgrundsnivåerna.*" (miljömål.se, 2017). Den samtida ambitionen finns att ställa om från en fossilbaserad ekonomi till en cirkulär och biobaserad ekonomi (Regeringskansliet, 2017; Naturvårdsverket, 2017). I denna omställning är ett hållbart nyttjande av naturresurser en viktig del (Regeringskansliet, 2017). Då fosforrika restprodukter ofta kan innehålla föroreningar i olika utsträckning (Eriksson, 2011; Sternbeck, 2011; Ottoson, 2011) kan en målkonflikt därför finnas (Palm, 2011).

6.1 Föroreningar i fosforgödselmedel

De flesta gödselmedel innehåller ämnen som vid för höga koncentrationer kan vara giftiga för människan (Eriksson, 2011). Olika typer av restprodukter skiljer sig gällande halter av tungmetaller, risker för smittämnen och organiska föreningar (Jönsson, et al. 2013; Salomon & Wivstad, 2013). Det är dock först när föroreningshalter överstiger vissa tröskelvärden som de anses utgöra fara för människa och miljö (Sternbeck, 2011). Flera av växters essentiella näringsämnen räknas som tungmetaller och är toxiska då de återfinns i för höga koncentrationer (Eriksson et al., 2015). Metaller som kadmium (Cd), bly (Pb) och kvicksilver (Hg) har dock inga kända livsnödvändiga funktioner för växter. Dessa tre ämnen är toxiska för många organismer redan i låga koncentrationer. Cd är generellt mycket mer växttillgänglig än Pb och Hg då dessa förekommer i marken.

Gällande recirkulering av fosfor har kadmium diskuterats mycket (Boije af Gennäs, 2011; Bertilsson, 2011). Kadmium kan orsaka ökad risk för benskörhet, skada njurarna, ha hormonstörande egenskaper och vara cancerogent (Boije af Gennäs, 2011). Halter av tungmetaller som kadmium, bly och kvicksilver har minskat i avfall över tid allt eftersom dessa ämnen successivt fasas ut i samhället (Balmér, 2001; Holm & Staaf, 2001). Kadmium förekommer dock fortfarande i högre halter i avloppsslam än i både stallgödsel och handelsgödsel (Eriksson, 2011). Det anses vara av stor vikt att tungmetaller inte ackumuleras över tid i de brukade jordarna.

Förekomster av organiska föroreningar är också omdiskuterat (Sternbeck, 2011; Kirchmann & Cohen, 2011). I Sverige har över 200 olika organiska föroreningar påträffats i avloppsslam (Sternbeck, 2011). Dessa kan härstamma från bekämpningsmedel, tvättmedel, färg, mjukgörare, stabilisatorer och läkemedel. Organiska föroreningar kan ha hormonstörande, reproduktionsstörande, neurotoxiska och cancerogena effekter. Till skillnad från metaller kan de flesta organiska föroreningar brytas ner i naturen. Nedbrytbarheten varierar dock mellan olika ämnen där de mer svårnedbrytbara föreningarna kan riskera att ackumuleras i jorden. Växter tar vanligen upp organiska föroreningar endast i begränsad omfattning (Balmér, 2011; Sternbeck, 2011).

Att restprodukter innehåller föroreningar är ett av argumenten för att tillämpa olika tekniker för extrahering av fosfor ur avfall (Tideström, 2011; Kirchmann & Cohen, 2011). På så vis kan rena gödselprodukter i form av struvit och ammoniumfosfat erhållas. Nackdelar med

dessa tekniker är att reningsverk inte alltid är anpassade för ändamålet samt att olika typer av separata anläggningar behöver konstrueras (Tideström, 2011).

6.2 Arbuskulär mykorrhiza och föroreningar

Tungmetaller som Cd och Pb kan inverka negativt på förekomst av arbuskulära mykorrhizasvampar (AMF) (Andrade et al., 2003, 2004; Tullio et al, 2003; Janouskova & Vosatka, 2004). AMF kan dock återfinnas på marker som är kraftigt kontaminerade av tungmetaller (Meharg, 2004). Olika AMF-arter och AMF-ekotyper kan tolerera dessa olika bra (Weissenhorn et al, 1994; Glashoff et al., 1994; Tullio et al., 2003). Studier har visat att AMF kan bidra till hämrat tungmetallupptag hos värdväxter (Weissenhorn, Leyval et al., 1995, Joner & Leyval, 2001; Andrade et al., 2003, 2004, Janoušková et al., 2004). Andra studier har dock påvisat att även det motsatta kan inträffa (Killham & Firestone, 1983; Zaefarian et al., 2013). I saneringsprojekt, där förorenad mark renas med hjälp av växter, kan ökat tungmetallupptag hos växter vara önskvärt (Smith & Read, 2008). När syftet är matproduktion är istället ett hämrat upptag av föroreningar av intresse (ibid).

AM-hyfer har förmåga att ta upp metaller som Cu, Zn, Cd, Ni och U, där de två förstnämnda är essentiella för växter i små doser, men likt de tre senare är de istället giftiga när de tas upp i större mängder (Smith & Read, 2008). Eftersom AM-symbioser ofta resulterar i ökat fosforupptag, med ökad tillväxt som följd, kan en utspädningseffekt erhållas även i fall där AM samtidigt resulterat i högre upptag av tungmetaller (El-Kherbawy et al., 1989). AM kan även resultera i förhöjda koncentrationer av tungmetaller i växters rötter samtidigt som upptaget till den ovanjordiska biomassan hämmas (Joner & Leyval, 1997; Chen et al., 2005). Tänkbara orsaker till minskat växtupptag av dessa ämnen är att de kan adsorberas till hyfers cellväggar, att AMF kan isolera tungmetaller inuti sina celler och sporer och att AMF kan utsöndra glomalin som gör tungmetaller i marken otillgängliga (Ferrol et al., 2016; Joner, Briones et al., 2000).

Organiska föroreningar kan skada växtceller genom att bidra till förhöjda halter av reaktiva syreföreningar i växten (Lenoir et al., 2016; Apel & Hirt, 2004). Arbuskulär mykorrhiza (AM) kan verka gynnsamt på växters etablering i miljöer som är kontaminerade av organiska föroreningar (Lenoir et al., 2016). Flera studier har visat att AMF bidrar till en skyddande effekt genom att gynna förekomst av antioxidativa enzymer i växten (Lenoir et al., 2016; Criquet et al., 2000; Rabie, 2005; Hernández-Ortega et al., 2012). Andra studier har dock visat att organiska föroreningar även kan reducera graden av mykorrhizakolonisering (Liu et al., 2004; Rabie, 2005; Chhabra & Jalali, 2013). Som i fallet med tungmetaller kan olika AMF-arter tolerera organiska föroreningar olika bra (Hassan et al., 2014). Gällande växters ackumulering av organiska föroreningar finns studier som tyder på att AM lett till högre upptag (Teng et al., 2010; Rabie, 2005), men andra studier har visat det motsatta (Binet et al., 2000; Wu et al., 2009; Gao et al., 2011).

6.3 Arbuskulär mykorrhiza och tungmetaller - några studier

Abdel-Aziz et al. (1997) utförde ett växthusförsök vid National Research Center i Kairo där växters upptag av tungmetaller studerades vid tillförsel av två typer av torkat förorenat avloppsslam. AM-inokulum användes som isolerats från en mark där avloppsslam tillförts i över 50 år. I försöket odlades bondböna (*Vicia faba* L.) som inokulerats med rhizobiumbakterier (*Rhizobium leguminosarum* bv. Viceae). Odlingssubstratet som användes i krukorna hämtades från fält. Det AM-inokulum som användes utgjordes av

arterna *Glomus clarum*, *G. mosseae* samt *G. fasciculatum*. Behandlingarna som ingick i försöket bestod av tillförsel av 0%, 0,5%, 1%, 2% eller 4% avloppsslam. Hälften av krukorna med respektive avloppsslamsmängd inokulerades med AMF.

Försöket visade att 2% avloppsslam resulterade i högst torrsvikt, högst antal kvävefixerande rotknölar och högst kväve- och fosforupptag, oavsett vilket slam som använts (Abdel-Aziz et al, 1997). De studerade parametrarna korrelerade signifikant med mängden avloppsslam som tillförts samt ifall AMF-inokulum använts eller inte. Rotkolonisering av mykorrhiza påverkades negativt då mer än 2% slam tillförts. Abdel-Aziz et al. (1997) menar att det kan ha berott på att höga koncentrationer av tungmetaller kan ha negativ effekt på sporgroning, hyftillväxt och hyfförgrening (Gildon & Tinker, 1983). För höga tungmetallhalter föreslås också ha varit anledningen till lägre förekomst av kvävefixerande rotknölar då 4% avloppsslam tillförts (Abdel-Aziz et al, 1997)

I kontrollbehandlingarna där avloppsslam inte tillförts ökade växtupptaget av metaller då AM inokulerats (Abdel-Aziz et al, 1997). Där avloppsslam tillförts var både substratets näringshalter och även halter av tungmetaller högre. Då AMF inokulerades i dessa behandlingar hämmades växtens upptag av tungmetaller till den ovanjordiska biomassan. Det minskade upptaget föreslås bero på AMF-hyers förmåga att adsorbera tungmetaller och på så vis göra dem otillgängliga för transport till växtens ovanjordiska delar. Abdel-Aziz et al (1997) konstaterade att studien indikerar att AM kan ha en roll att spela för att minska toxisk inverkan på växter då tungmetaller förekommer i höga koncentrationer i marken.

del Val et al. (1998) utförde ett växthuset försök vid Federal Research Centre for Agriculture i Braunschweig, Tyskland. Syftet var att studera olika AMF-ekotypers tolerans och anpassningsförmåga till förhöjda koncentrationer av tungmetaller. Purjolök (*Allium porrum*) och durra (*Sorghum bicolor*) användes som värdväxter. AMF-ekotyperna isolerades från marker som under lång tid tillförts kontaminerat avloppsslam. Två olika avloppsslam ingick, där den ena hade tillförts extra doser av tungmetaller. Grödorna odlades antingen i kontaminerat eller icke-kontaminerat odlingssubstrat. Föroreningshalterna var i samtliga fall under EU:s övre tillåtna gränser.

De AM-svampar som ingick i försöket var *Glomus claroideum* som isolerats från fält som endast tillförts oorganisk gödsel (180 kg N/ha/år), *Glomus claroideum* som isolerats från fält som tillförts kontaminerat avloppsslam (300 m³/ha/år), en oidentifierad *Glomus*-art som isolerats från ett fält med slam som innehöll mindre mängder föroreningar (100 m³/ha/år) samt även två *Glomus mosseae*-ekotyper som isolerats från ett mer och ett mindre kontaminerat fält (del Val et al., 1998). De odlingssubstrat som användes i försöket kom antingen från fältet som endast gödslats med oorganisk gödsel samt det fält där kontaminerat avloppsslam tillförts (300 m³/ha/år). Grödorna såddes i krukor med AM-inokulerade frön.

del Val et al. (1998) kunde visa att de isolerade AMF-ekotyperna skilde sig gällande koloniseringgrad i de kontaminerade och okontaminerade odlingssubstraten. Trenderna var samma oavsett värdväxt. I de behandlingar där substraten var minst förorenade var den okända *Glomus*-arten samt *G. mosseae* mest effektiv. Den okända *Glomus*-arten och *G. mosseae* hämmades dock kraftigt vid förekomst av tungmetaller. Detta märktes främst genom begränsad myceltillväxt samt mindre antal arbusklar inuti värdväxternas rötter. Även

G. claroideum hämmades vid närvaro av tungmetaller, men klarade sig bättre än de två andra arterna. Den *G. claroideum*-ekotyp som isolerats från det fält som var mest kontaminerat klarade sig bäst i närvaro av tungmetaller. del Val et al. (1998) menar att studiens resultat antyder att *G. claroideum* kan anpassa sig till förhöjda metallkoncentrationer. Vidare menar de att det kan vara av intresse att förädla fram toleranta AMF-ekotyper, eftersom AMF kan ha en roll att spela vid restaurering av kontaminerade ekosystem.

Weissenhorn, Mench et al. (1995) utförde en studie i ett långtidsfältsförsök vid Institut National de la Recherche Agronomique i Bordeaux, Frankrike. Majs (*Zea mays* L.) odlades på fält som tillfördes två olika typer av avloppsslam. De undersökte i vilken mån tungmetaller förekom i växttillgänglig form, i vilken mån de togs upp av den odlade grödan och även förekomst av arbuskulär mykorrhiza. Den ena typen av avloppsslam var huvudsakligen förorenad av Zn och Mn och den andra av Cd och Ni. Dessa tillfördes i två olika mängder: 10 ton/ha/år eller 100 ton/ha/år. Kontrollbehandlingarna utgjordes av ytor som endast tillförts oorganisk gödsel eller stallgödsel.

Upptaget av Cd, Ni och Zn korrelerade generellt med markens halter av metallerna (Weissenhorn, Mench et al., 1995). Det var alltså högre i fallen med de kontaminerade behandlingarna. Riklig mykorrhizakolonisering gav ingen hämmande effekt på växtupptag av dessa ämnen. I ena behandlingen där kontaminerat slam tillfördes var koloniseringsgraden mycket högre än i kontrollbehandlingarna. I kontrollbehandlingarna (som inte var kontaminerade) var markens fosforkoncentrationer högre. Weissenhorn, Mench et al. (1995) menar att studien indikerade att AM-svamparna tolererade förhöjda metallkoncentrationer bättre än förhöjda P-koncentrationer. Vidare konstaterade de att det kan vara riskabelt att förlita sig på AM för att förhindra tungmetallupptag inom jordbruk. Utöver att den hämmande effekten kan utebli så kan även andra viktiga mikrobiella samhällen tänkas missgynnas av tungmetaller i högre utsträckning än toleranta AM-svampar (Weissenhorn, Mench et al., 1994).

7. Diskussion

7.1 Arbuskulär mykorrhiza för effektivt fosfornyttjande vid användning av restprodukter

Markens/odlingssubstratets innehåll av växttillgänglig fosfor är en faktor som påverkar både förekomst av arbuskulär mykorrhiza (AM) och i vilken utsträckning som AM har en roll att spela för grödors fosforupptag (Smith et al., 2011). Höga halter av växttillgänglig fosfor, som ofta är fallet vid mineralgödning, kan missgynna förekomst av arbuskulär mykorrhiza (Nagahashi et al., 1996; Douds & Schenck, 1990). När markens fosfor förekommer i mer svårslösliga former kan AM-hyfer öka växters fosforupptag (Evert & Eichhorn, 2013; Smith & Read, 2008). Detta avspeglades i de olika studier som tagits upp i det här arbetet.

De restprodukter som inkluderats i arbetet kan olika mån ses som långsamverkande, med undantag för biogödsel (Wentzel & Joergensen, 2016; Georg Carlsson, pers.medd.) där växttillgänglig näring ofta kan finnas i höga halter och biokol (Hammer et al., 2014; Morales et al., 2013; Yao et al., 2013) vars beskaffenheter kan variera kraftigt beroende av framställningsmetod. I flera av studierna, såsom i fallen med avloppsslam (Linderholm, 2012; Seleiman et al., 2013), struvit (Heydari & Maleki, 2014) benmjöl (Vestberg, 1992) och stallgödsel (Gollner et al., 2011) var effekten av den tillförda restprodukten positiv gällande förekomst av arbuskulär mykorrhiza (AM) jämfört med då fosfor istället tillfördes som mineralgödsel.

Att rötresten (biogödsel) i de två studier som inkluderats i arbetet (Wentzel & Joergensen, 2016; Georg Carlsson, pers.medd.) hade en missgynnande effekt på förekomst av AM tros ha berott på höga halter av växttillgänglig näring. Även i den metaanalys som Biederman & Harpole (2013) utförde gällande biokol framhölls förhöjda fosforhalter som en faktor i de fall då biokol hade negativ inverkan på AMF.

Det framgick att AM gynnade växters fosforupptag i fallen med tillförsel av avloppsslam (Mackaya et al., 2017), biokol (Hammer et al., 2014) benmjöl (Kahiluoto & Vestberg, 1998) och struvit (Heydari & Maleki, 2014). Linderholm (2012) och även Seleiman et al. (2013) konstaterade att det är möjligt att erhålla både god avkastning och hög grad av mykorrhizakolonisering vid tillförsel av avloppsslam. Heydari & Maleki (2014) konstaterade att struvit tillsammans med AM-inokulering i fält resulterade i god avkastning. I fallet med tillförsel av stallgödsel konstaterade Gollner et al. (2011) att stallgödsel tillsammans med hög förekomst av arbuskulär mykorrhiza kan bidra till hållbara och skördestabla odlingssystem.

Det är dock kritiskt att tillräcklig mängd växttillgänglig näring erhålls vid tillförsel av restprodukter (Linderholm, 2012). Då benmjöl användes som fosforkälla vid odling av jordgubbe och majs konstaterade Vestberg (1992) att en kompromiss bör göras gällande näringstillförsel för att både möjliggöra förekomst av arbuskulär mykorrhiza och plantor av god storlek. Linderholm (2012) påpekar att tillförsel av lättlöslig fosfor är av stor betydelse då vädermässiga faktorer som låg nederbörd hämmar markens mineraliseringsprocesser. Utöver biogödsel, där höga halter fosfor kan finnas i växttillgänglig form (Wentzel & Joergensen, 2016), finns även tekniker för att extrahera lättlöslig ammoniumfosfat ur restavfall (Kirchmann & Cohen, 2011; Tideström, 2011). I de fall som tillförsel av

snabbverkande gödsel är nödvändigt för att möta grödornas direkta behov så kan det därför tänkas att snabbverkande restprodukter kan användas.

Utöver markens/odlingssubstratets näringshalter finns fler faktorer som kan påverka förekomst av AM. I studien som Ishii & Kadoya (1994) utförde framgick det att tillförsel av biokol kan gynna förekomst av AM genom att neutralisera odlingssubstratets pH samt genom att adsorbera toxiska ämnen som annars kan förhindra sporgroning. AM-hyfer kan även växa in i mikroporer som kan utgöra skydd för dem mot svampätande markorganismer (Hammer et al., 2014; Warnock et al., 2007). I studien med mångårig tillförsel av stallgödsel (Gollner et al., 2011) berodde inte stallgödslets AM-gynnande effekt på lägre halter växttillgänglig fosfor jämfört med mineralgödsling. Istället drog Gollner et al. (2011) slutsatsen att det organiska materialet i stallgödslet haft en positiv inverkan på markförhållandena som i sin tur varit gynnsam för AMF-svampars överlevnad.

Naturligt förekommande AMF-samhällen kan gynnas genom lämpliga odlings- och markbearbetningsmetoder (Smith & Read, 2008). Faktorer såsom minimering av markstörande ingrepp (plöjning och markkompaktering) och tillämpande av mykorrhizagynnande växtföljder (ofta återkommande AM-kompatibla växtslag) kan inverka positivt på markens AMF-samhällen. Föroreningar, fungicider och långa perioder av träda är faktorer som istället kan ha negativ inverkan (Smith & Read, 2008; Roy-Bolduc & Hijri, 2011). En annan möjlig väg att gå är att nyttja kommersiella AMF-inokulumpreparat. AMF kan inokuleras där AMF endast förekommer i begränsad omfattning eller där de naturligt förekommande samhällena är ineffektiva (Smith & Read, 2008). Inokulering av pluggplantor innan de sätts ut i fält kan möjliggöra att speciellt utvalda AMF-arter får konkurrensfördelar gentemot de naturligt förekommande arterna. Det kan tänkas att arter som fungerar effektivt vid höga halter fosfor kan inokuleras i situationer där fosforhalterna är höga (ibid).

Kahiluoto & Vestberg (1998) visade att AMF-inokulering gynnade grödors fosforupptag i ett konventionellt odlingssystem, medan samma inokulum inte ökade grödors fosforupptag vid odling på fält där ekologiska metoder tillämpades. Den uteblivna effekten i sistnämnda fallet berodde på rik förekomst av effektiva naturligt förekommande AMF-populationer. Roy-Bolduc & Hijri (2011) menar att det finns ett behov av att utveckla effektiva analysmetoder för att fastställa markers mykorrhizastatus. Att utröna hur de förekommande AMF-arterna fungerar i relation till de odlade grödorna och de odlingsmetoder som tillämpas skulle möjliggöra för odlare att agera därefter.

Hur mycket AM bidrar till växtens fosforupptag och tillväxt kan påverkas av vilken växtart och AMF-art som ingår i symbios (Smith & Read, 2008). Samma växtart ingår ofta i symbios med flera olika AMF-arter (Smith & Read, 2008). Generellt gynnas växter som har mindre rotsystem och låg förekomst av rothår mest av AM (Smith et al., 2011). Det är inte alltid som AM har en positiv inverkan på värdväxten. Tillväxtdepressioner kan vid begränsad ljusstillgång uppkomma hos växter till följd av konkurrens mellan svamp och växt om assimilerade kolhydrater. Graham & Abbot (2000) visade att minskad tillväxt vid odling av vete inträffade som följd av att rötter koloniserats av aggressiva AMF-arter. Att vissa grödor svarar dåligt på kolonisering av AMF kan även vara ett resultat av att framförädling av moderna grödor inte har tagit hänsyn till AM-kompatibilitet (Smith & Read, 2008; Hetrick et al., 1996). Därför kan det finnas potential för nutida växtförädlare att implementera tillgänglig

kunskap om AM för att förädla fram grödor med ett mer effektivt fosfornyttjande (Smith & Read, 2008).

Med bakgrund av de sinande råfosfatreserverna och de miljömässiga konsekvenser som övergödning har är dagens globala överanvändande av mineralgödsel inte långsiktigt hållbar (Cordell & Rosemarin, 2011, Selenius, 2011; Dawson & Hilton, 2011; WWF, 2010; Faucon et al., 2015). Strävan mot ett mer effektivt fosfornyttjande inom jordbruket kräver troligen en kombination av många olika åtgärder (Faucon et al., 2015; Cordell & Rosemarin, 2011; Kirchmann & Cohen, 2011). De två faktorer som undersöktes i detta arbete, recirkulering av fosforinnehållande restprodukter och gynnande av arbuskulär mykorrhiza, kan här ha en roll att spela (Karunanithi, 2015; Linderholm & Mattsson, 2013; Roy-Bolduc & Hijri, 2011; Berutti et al., 2016; Elbon & Whalen, 2014). Intresset för att upprätthålla effektiva AMF-populationer i marken kan komma att öka då priset för handelsgödsel tros kunna komma att stiga (Smith & Read, 2008).

7.2 Arbuskulär mykorrhiza för att begränsa grödors upptag av föroreningar

Arbuskulära mykorrhizasvampar (AMF) kan återfinnas på marker som är kraftigt kontaminerade av tungmetaller (Meharg, 2003). Olika AMF-arter och AMF-ekotyper kan tolerera tungmetaller olika bra (Weissenhorn et al., 1994; Tullio et al., 2003). Hög förekomst av tungmetaller kan också påverka AMF negativt genom att förhindra sporgroning och hyfttillväxt (Hepper, 1979; McGee, 1987), minskad sporproduktion (del Val et al., 1998) och reducerad eller fördröjd rotkolonisering (Gildon & Tinker, 1981). I studien som del Val et al. (1998) utförde var det ekotyper av *Glomus claroideum* som klarade sig bäst i närvaro av förhöjda tungmetallhalter, medan *G. sp.* (okänd art) och *G. mosseae* hämmades kraftigt. De föreslog att särskilt tungmetalltoleranta ekotyper kan isoleras för att använda vid restaurering av kontaminerade ekosystem. Betydelser som arbuskulär mykorrhiza kan ha för växter i fytoremedieringsprojekt har föreslagits vara: reducering av tungmetallinducerad stress, ökat växtupptag av metaller, samt påverkan på metallers translokering inuti växten (Elgharably & Allam, 2013).

När det kommer till produktion av livsmedelsgrödor är det av förklarliga skäl istället minskat tungmetallupptag som är av intresse (Smith & Read, 2008). I flera studier har AM-koloniserade rötter lett till hämmat tungmetallupptag (Weissenhorn, Leyval et al., 1995, Joner & Leyval, 2001; Andrade et al., 2003, 2004, Janoušková et al., 2004). AMF kan reducera växters tungmetallupptag genom en rad olika mekanismer såsom adsorption av tungmetaller till hyfers cellväggar, utsöndring av glomalin som gör tungmetaller i marken otillgängliga, isolering inuti AMF-celler genom komplexbildning mellan tungmetaller och olika ligander, samt isolering av tungmetaller inuti cellers vakuoler och i AMF-sporer (Ferrol et al., 2016; Joner, Briones et al., 2000).

I studien som finns beskrivet i detta arbete, som Abdel-Aziz et al. (1997) utförde, tog AM-koloniserade grödor upp mindre tungmetaller än vad okoloniserade grödor gjorde vid tillförsel av kontaminerat avloppsslam. Effekten av AM i kontaminerade miljöer beror, förutom AM-art, också på vilket växtslag som odlas. Elgharably & Allam (2013) utförde en studie där pepparmynta (*Mentha x piperita*) och basilika (*Ocimum basilicum*) användes. I frånvaro av AM tog pepparmynta (*Mentha x piperita*) upp betydande mängder Fe och Mn från kontaminerat substrat medan basilika (*Ocimum basilicum*) tog upp jämförelsevis mer Cd, Pb, Zn och Cu. När växterna var koloniserade av AMF minskade upptaget av samtliga

metaller då värdväxten var basilika, medan upptaget istället ökade i närvaro av AM då värdväxten var pepparmynta. Flera studier har bekräftat att AM-kolonisering kan leda till ökat tungmetallupptag (Killham & Firestone, 1983; Zaefarian et al., 2013).

Likt fallet med tungmetaller kan förekomst av arbuskulär mykorrhiza gynna växters vitalitet i miljöer som är kontaminerade av organiska föroreningar (Lenoir et al., 2016). Även här har dock olika arter visat sig tolerera organiska föroreningar olika bra (Hassan et al., 2014). AMF kan bidra till en skyddande effekt genom att gynna förekomst av antioxidativa enzymer i växten (Lenoir et al., 2016; Criquet et al., 2000; Rabie, 2005; Hernández-Ortega et al., 2012). En annan faktor är att förekomst av AMF-hyfer kan ha positiv inverkan på växters vattenupptag då organiska föroreningar adsorberas till växtrötter, med minskat vattenupptag som följd (Binet et al., 2000). Även om organiska föroreningar generellt bara tas upp av växter i begränsad omfattning (Balmér, 2011; Sternbeck, 2011) kan AM bidra till ökat upptag, som i fallet med PCB och Alfalfa (*Medicago sativa* L.) (Teng et al., 2010) och PAH och vete (*Triticum aestivum* cv. Sakha 8), mungböna (*Vigna radiata* V 2010) och äggplanta (*Solanum melongena* L.) (Rabie, 2005).

Gynnande av AM har troligen en roll att spela vid fyto Remediering av kontaminerad mark både vid förekomst av tungmetaller (Elgharably & Allam, 2013; Zaefarian et al., 2013; Tullio et al., 2003; Hassan et al., 2014; Weissenhorn, Leyval et al., 1995) och organiska föroreningar (Binet et al., 2000; Wu et al., 2008; Teng et al., 2010; Lu et al., 2014; Gao et al., 2011). När det istället kommer till att förhindra bioackumulering av gifter inom livsmedelsproduktion verkar dock inte arbuskulär mykorrhiza vara en tillförlitlig faktor. Även om tungmetalltoleranta AMF-arter eventuellt skulle kunna användas för att hämma gröders föroreningsupptag så kan andra viktiga mikrobiella samhällen missgynnas vid förhöjda metallhalter (Weissenhorn, Mench et al., 1995). Utöver det kan arbuskulär mykorrhiza även leda till ett högre upptag av både tungmetaller och organiska föroreningar (Weissenhorn, Mench et al., 1995; Teng et al., 2010; Rabie, 2005).

Hur AMF påverkas vid förekomst av tungmetaller och organiska föroreningar och hur AM-symbioser kan påverka växters upptag av föroreningar är beroende av många samverkande faktorer (Weissenhorn, Leyval et al., 1995; Andrade et al., 2003; Lenoir et al., 2016; Elgharably & Allam, 2013). Det är ett komplext område som inte kan generaliseras och effekterna kan variera beroende på växtart, AMF-art, växtens vitalitet, vilka typer av föroreningar det handlar om och i vilka koncentrationer de förekommer. Ett mer rimligt alternativ för att säkra giffria produkter tycks därför vara att reglera tillåtna föroreningshalter i restprodukter genom certifieringssystem med bestämda gränsvärden (Palm, 2011; Sternbeck, 2011; Staaf & Holm, 2011). Teknologier för att extrahera föroreningsfria fosforföreningar ur avfall kan ha en roll att spela för att undvika bioackumulering av gifter i grödor (Tideström, 2011; Kirchmann & Cohen, 2011).

8. Slutsatser

Många forskare påpekar att arbuskulär mykorrhiza (AM) har en roll att spela gällande att effektivisera fosfornyttjandet vid växtproduktion. I flertalet av de studier som inkluderats i detta arbete har tillförsel av restprodukter haft en gynnande effekt på förekomst av arbuskulär mykorrhiza. Detta har i sin tur ofta visat sig öka värdväxters fosforupptag. Hur de restprodukter som tillförs påverkar halter av växttillgänglig fosfor verkar vara en kritisk faktor för förekomst av AM, där höga koncentrationer kan vara missgynnande. Det kan finnas behov av metoder för att enkelt kunna analysera markers mykorrhizastatus, så att odlare kan fatta beslut gällande vilka metoder som bör tillämpas för gynnande av AM. Det finns även potential för växtförädlare att ta fram grödor som svarar bättre på AM-kolonisering, då egenskapen troligen i vissa fall gått förlorad vid framtagning av moderna grödor. Intresset för arbuskulär mykorrhiza inom hortikultur och jordbruk kan komma att öka eftersom kostnader för gödsel tros kunna stiga.

De effekter AM kan ha gällande växters upptag av tungmetaller och organiska föroreningar kan inte generaliseras, då många komplexa biotiska och abiotiska faktorer är inblandade. Studier har visat att AM kan hämma upptag av både tungmetaller och organiska föroreningar, men studier med motsatta resultat förekommer också. Många forskare är eniga om att AM kan ha en roll att spela i fyto Remedieringsprojekt. För att förhindra ackumulering av föroreningar i livsmedel är effekten av AM dock troligen inte en tillförlitlig faktor. Ett bättre alternativ är antagligen att inte tillföra restprodukter där föroreningsinnehållet överstiger bestämda tröskelvärden. Extrahering av föroreningsfria fosfatföreningar ur avfall kan ha en roll att spela för att säkra giffria produkter.

Referenser

- Abdel-Aziz, R.A., Radwan, S.M.A., Dahdoh, M.S. (1997). Reducing the heavy metals toxicity in sludge amended soil using VA mycorrhizae. *Egyptian Journal of Microbiology*, vol. 32, ss. 217-234.
- Akiyama, K., Matsuzaki, K-I, Hayashi, H. (2005). Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*, vol. 435, ss. 824–827.
- Andrade, S.A.L., Abreu, C.A., Abreu, M.F., Silveira, A.P.D. (2003). Interaction between lead, soil base saturation rate, and mycorrhiza on soybean development and mineral nutrition. *R. Bras. Ci. Solo*, vol. 27, ss. 945-954,
- Andrade, S.A.L., Abreu, C.A., Abreu, M.F., Silveira, A.P.D. (2004). Influence of lead additions on arbuscular mycorrhiza and Rhizobium symbioses under soybean plants. *Applied Soil Ecology*, Vol. 26, ss. 123-131.
- Apel, K. & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, vol. 55, ss. 373-399
- Aranda, E., Scervino, J.M. & Godoy, P. (2013). Role of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizoglyphus custos* in the dissipation of PAHs under root-organ culture conditions. *Environmental pollution*, vol. 181, ss. 182-189.
- Arden-Clarke, C., Hodges, R.D. (1988). The Environmental Effects of Conventional and Organic/Biological Farming systems. II. Soil Ecology, Soil Fertility and Nutrient Cycles. *Biological Agriculture & Horticulture*, vol. 5, ss. 223-287.
- Balmér, P. (2011). Svenskt avloppsslam – något för åkermarken? I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 211-224.
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R, Bianciotto, V. (2016). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Front. Microbiol.*, Tillgänglig: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559> [2018-04-30]
- Bertilsson, G. (2011). Fosforreserver finns – men flödena måste ändå minskas I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 87-100.
- Biederman, L.A., Stanley Harpole, W. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Bioenergy*, vol. 5, ss. 202-214
- Binet, P., Portal, J.M. & Leyval, C. 2000. Fate of polycyclic aromatic hydro-carbons (PAH) in the rhizosphere and mycorrhizosphere of ryegrass. *Plant and Soil*, vol. 227, ss. 207–213.
- Boije af Gennäs, U. (2011). Det kan dröja innan slam är en hållbarfosforkälla. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 199-208.
- Cabala-Rosand, P., Wild, A. (1982). Direct use of low grade phosphate rock from Brazil as fertilizer: I. Effect of reaction time in soil. *Plant and Soil*, vol. 65, ss. 351-362.
- Carlsson, T. (2016). Många vill återvinna fosfor. *Jordbruksaktuellt*, 29 februari. Tillgänglig: <http://www.ja.se/artikel/49776/manga-vill-atervinna-fosfor.html> [2018-02-25]
- Chen, B., Roos, P., Borggaard, O.K., Zhu, Y.G., Jakobsen, I. (2005). Mycorrhiza and root hairs in barley enhance acquisition of phosphorus and uranium from phosphate rock but mycorrhiza decreases root to shoot uranium transfer. *New Phytologist*, vol. 165, ss. 591-598.
- Chhabra, M.L., Jalali, B.L. (2013). Impact of pesticides-mycorrhiza interaction on growth and development of wheat. *JBiopest*, vol. 6, ss. 129-132.
- Christie, P., Li, X., Chen, B. (2004). Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc. *Plant and Soil*, vol. 261, ss. 209–217
- Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., Carliell-Marquet, C. (2011). The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, vol 57, ss. 78-86.
- Cordell, D., Rosemarin, A. (2011). Det behövs en global fosforkonvention. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 55-60.
- Criquet, S., Joner, E., Leglize, P. & Leyval, C. 2000. Anthracene and mycorrhiza affect the activity of oxidoreductases in the roots and the rhizosphere of lucerne (*Medicago sativa* L.). *Biotechnology Letters*, vol. 22, ss. 1733–1737.
- Dawson, C.J., Hilton, J. (2011). Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, vol. 36, ss. S14-S22
- de Val, C., Barea, J.M., Azco Ñn-Aguilar, C. (1999). Assessing the tolerance to heavy metals of arbuscular mycorrhizal fungi isolated from sewage sludge-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, vol. 11, ss. 261-269.
- Dighton, J. (1991). Acquisition of nutrients from organic resources by mycorrhizal autotrophic plants. *Experientia*, vol. 47, ss. 362–369

- Dodd, J.C., Burton, C.C., Burns, R.G., Jeffries, P. (1987). Phosphatase Activity Associated with the Roots and the Rhizosphere of Plants Infected with Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *New Phytologist*, vol. 107, ss. 163-172.
- Douds, D.D.D JR., Schenck, N.C. (1990). Relationship of colonization and sporulation by VA mycorrhizal fungi to plant nutrient and carbohydrate contents. *New Phytologist*, vol. 116, ss. 621-627
- Ekobalans. (u.å.a). *eco:P – Fosfor*. Tillgänglig: <http://www.ekobalans.se/sv/teknologi/eco-p-fosfor> [2018-03-16]
- Ekobalans. (u.å.b). *eco:S - Organiskt*. Tillgänglig: <http://www.ekobalans.se/sv/teknologi/eco-s-organiskt> [2018-02-25]
- Elbon, A., Whalen, J.K. (2014). *Phosphorus supply to vegetable crops from arbuscular mycorrhizal fungi: a review*.
- Elgharably, A., Allam, N. (2013). Effect of arbuscular mycorrhiza on growth and metal uptake of basil and mint plants waste water irrigated Soil. *Egypt. J. Soil Sci*, vol. 53, ss. 613-625.
- El-Kherbawy, M., Angle, J.S, Heggo, A., Chaney, R.L. (1989). Soil pH, rhizobia, and vesicular-arbuscular mycorrhizae inoculation effects on growth and heavy metal uptake of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Biology and Fertility of Soils*, vol. 8, ss. 61–65.
- Eriksson, J. (2011). Se upp med spårelementen – i alla gödselmedel. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 225-242.
- Eriksson, J., Dahlin S., Nilsson, I. Simonsson M. (2015). *Marklära*. 1:4 uppl. Lund: Studentlitteratur AB
- Elser, J.J., Bracken, M.E.S., Cleland, E.E., Gruner, D.S., Harpole, W.S., Hillebrand, H., Ngai, J.T., Seabloom, E.W., Shurin, J.B., Smith, J.E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, vol 10, ss. 1135-1142.
- Evert, R., & Eichhorn, S. (2013). *Raven biology of plants* . 8 uppl. New York: W.H. Freeman and Company.
- Fabig, B., Moawad, A.M., Achtnich, W. (1989). Effect of VA Mycorrhiza on Dry Weight and Phosphorus Content in Shoots of Cereal Crops Fertilized with Rock Phosphates at Different Soil pH and Temperature Levels. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, vol. 152, ss. 255-259.
- Faucon, M-P., Houben, D., Reynoirds, J-P., Mercadal-Dulaurent, A-M., Armand, R., Lambers, H. (2015). Advances and Perspectives to Improve the Phosphorus Availability in Cropping Systems for Agroecological Phosphorus Management. *Advances in Agronomy*, vol. 134, ss. 51-79.
- Ferrol, N., Tamayo, E., Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *J Exp Bot*, vol. 67, ss. 6253-6265.
- Finnson, A. (2011). Slamanvändning och slamdebatt – ett europeiskt perspektiv. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 295-306.
- Fredriksson, F (2011). Investeringar för återvinning - klargör motiven!. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 396-398.
- Gao, Y., Li, Q., Ling, W. & Zhu, X. 2011. Arbuscular mycorrhizal phytoremediation of soils contaminated with phenanthrene and pyrene. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 185, ss. 703–709.
- Gianinazzi, S., Vosatka, M (2004). Inoculum of arbuscular mycorrhizal fungi for production systems: Science meets business. *Canadian Journal of Botany*, vol 82, ss. 1264-1271.
- Gildon, A. & Tinker, P.B. (1983). Interactions of vesicular – arbuscular mycorrhizal infection and heavy metals in plants. I. The effect of heavy metals on the development of VA mycorrhizas. *New phytologist*, vol. 95, ss. 247-261.
- Glaser, B. (2006). *Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century*
- Gollner, M.J., Wagenristl, H., Liebhard, P., Friedel, J. K. (2011). Yield and arbuscular mycorrhiza of winter rye in a 40-year fertilisation trial. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 31, ss. 373–378.
- Graham, J.H., Abbott, L.K. (2000). Wheat responses to aggressive and non-aggressive arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, vol. 220, ss. 207-218.
- Hammer, E.C., Balogh-Brunstad, Z., Jakobsen, I., Olsson, P-A, Stipp, S.L.S., Rillig, M.C. (2014). A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 77, ss. 252-26.
- Hassan SE-D, Bell TH, Stefani FOP, Denis D, Hijri M, et al. (2014). Contrasting the Community Structure of Arbuscular Mycorrhizal Fungi from Hydrocarbon-Contaminated and Uncontaminated Soils following Willow (*Salix* spp. L.) Planting. *PLOS ONE*. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102838>
- Henze, M. (2011). Fosfor i kretslopp – en läsanvisning. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 182-186.

- Henze, M. (2011). Fosfor i kretslopp – en läsanvisning. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 182-186.
- Hernández-Ortega, H.A., Alarcóna, A., Ferrera-Cerratoa, R., Zavaleta-Mancerab, H.A., López-Delgadoc, H.A. & Mendoza-López, M.R. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi on growth, nutrient status, and total antioxidant activity of *Melilotus albus* during phytoremediation of a diesel-contaminated substrate. *Journal of Environmental Management*, vol. 95, ss. S319-S324.
- Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., Todd, T.C. (1996). Mycorrhizal response wheat cultivars: relationship to phosphorus. *Canadian Journal of Botany*, vol. 74, ss. 19-25.
- Heydari, M.M., Maleki, A. (2014). Effect of phosphorus sources and mycorrhizal inoculation on root colonization and phosphorus uptake of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci*, vol. 3, ss. 235-248.
- Holm, M., Staaf, H. (2011). Fosforåtervinning ur avlopp – Naturvårdsverkets aktionsplan. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 187-198.
- Ishii, T., Kadoya, K. (1994). Effects of Charcoal as a Soil Conditioner on Citrus Growth and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Development. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, vol. 63, ss. 529-535.
- Jakobsen, I., Abbott, L.K., Robson, A.D. (1992). External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. *New Phytologist*, vol. 120, ss. 371-380.
- Janoušková, M., Vosátka, M. (2004). Response to cadmium of *Daucus carota* hairy roots dual cultures with *Glomus intraradices* or *Gigaspora margarita*. *Mycorrhiza*, vol. 15, ss. 217-224.
- Janoušková, M., Pavlíková, D., Macek, T., Vosátka, M. (2004). Arbuscular mycorrhiza decreases cadmium phytoextraction by transgenic tobacco with inserted metallothionein. *Plant and Soil*, vol. 272, ss. 29–40.
- Johansson, B. (2011). Fakta om avloppsrening och slam. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 176-181.
- Johnson, N.C. (2010). Resource stoichiometry elucidates the structure and function of arbuscular mycorrhizas across scales. *New Phytologist*, vol. 185, ss. 631-647.
- Johnson, N.C., Angelard, C., Sanders, I.R., Kiers, E.T. (2013). Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change. *Ecology Letters*, vol. 16, ss. 140-153
- Joner, E.J., Briones, R., Leyval, C. (2000). Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. *Plant and Soil*, vol. 226, ss. 227–234.
- Joner, E.J., Jakobsen, I. (1994). Contribution by two arbuscular mycorrhizal fungi to P uptake by cucumber (*Cucumis sativus* L.) from ³²P-labelled organic matter during mineralization in soil. *Plant and Soil*, vol 163, ss. 203–209.
- Joner, E.J., Jakobsen, I. (1995). Growth and extracellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 27, ss. 1153-1159.
- Joner, E.J., Leyval, C. (1997). Uptake of ¹⁰⁹Cd by roots and hyphae of a *Glomus mosseae*/*Trifolium subterraneum* mycorrhiza from soil amended with high and low concentrations of cadmium. *New Phytologist*, vol. 135, ss. 353-360.
- Joner, E., Leyval, C. (2001). Time-course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimes. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 33, ss. 351–357.
- Joner, E.J., Magid, J., Gahoonia, T.S., Jakobsen, I. (1995). P depletion and activity of phosphatases in the rhizosphere of mycorrhizal and non-mycorrhizal cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 27, ss. 1145-1151.
- Joner, E.J., van Aarle, I.M., Vosatka, M. (2000). Phosphatase activity of extra-radical arbuscular mycorrhizal hyphae: A review. *Plant and Soil*, vol. 226, ss. 199–210.
- Jordbruksverket, (2017). *Rötrest och kompost*. Tillgänglig: www.jordbruksverket.se/amnesomraden/djur/produkterfrandjur/organiskagodningsmedel/rotrestochkompost.4.37e9ac46144f41921cd324f8.html [2018-02-02]
- Jönsson, H., Nordberg, Å., Vinnerås, B. (2013). *System för återföring av fosfor i källsorterade fraktion av urin, fekalier, matavfall och i liknande rötat samhälls- och lantbruksavfall*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet (Rapport 061). Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/10616/11/jonsson_etal_130703.pdf [2018-04-30].
- Kahiluoto, H., Vestberg, M. (1996). The Effect of Arbuscular Mycorrhiza on Biomass Production and Phosphorus Uptake from Sparingly Soluble Sources By Leek (*Allium porrum* L.) in Finnish Field Soils. *Biological Agriculture & Horticulture*, vol. 16, ss. 65-85.
- Karunanithi, R., Szogi, A.A., Bolan, N., Naidu, R., Loganathan, P., Hunt, P.G., Vanotti, M.B., Saint, C.P., Ok, Y.S., Krishnamoorthy, S. (2015). Phosphorus Recovery and Reuse from Waste Streams. *Advances in Agronomy*, vol. 131, ss. 173-250

- Killham, K., Firestone, M.K. (1983). Vesicular arbuscular mycorrhizal mediation of grass response to acidic and heavy metal depositions. *Plant and Soil*, vol. 72, ss. 39-48.
- Kirchmann, H., Cohen, Y. (2011). Fosforåtervinning ur avloppssystem - rena och växttillgängliga produkter. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 321-338.
- Klironomos, J.N. (2003). Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecology*, vol. 84, ss. 2292-2301
- Koide, R.T., Kabir, Z. (2000). Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate. *New Phytologist*, vol. 148, ss. 511–517.
- Krüger, M., Krüger, C., Walker, C., Stockinger, H., Schüßler, A. (2012). Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist*, vol. 193, ss. 970–984.
- Kvarnström, E., Johansson, M. (2011). Dags att fasa in källsorterande avlopp i VA-systemet. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 351-368.
- Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol 11, ss. 403–427.
- Lenoir, I., Sahraoui, L-A., Fontaine, J. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal-assisted phytoremediation of soil contaminated with persistent organic pollutants: a review. *European Journal of Soil Science*, vol. 67, ss. 624-640.
- Linderholm, K. (2011). Fosforkampen i marken. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 113-126.
- Linderholm, K. (2012). *Phosphorus: Flows to Swedish Food Chain, Fertilizer Value, Effect on Mycorrhiza and Environmental Impact of Reuse*. Diss. Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Linderholm, K., Mattson, J.E. (2013). *Analys av fosforflöden i Sverige*. Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet (Rapport 2013:5). Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/9439/18/linderholm_et_al_130208.pdf [2018-03-16]
- Liu, S.L., Luo, Y.M., Cao, Z.H., Wu, L.H., Ding, K.Q. & Christie, P. (2004). Degradation of benzo[a]pyrene in soil with arbuscular mycorrhizal alfalfa. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 26, ss. 285–293.
- Lu, Y.F., Lu, M. & Peng, F. (2014). Remediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil by using a combination of ryegrass, arbuscular mycorrhizal fungi and earthworms. *Chemosphere*, vol. 106, ss. 44–50.
- Mackaya J.E., Cavagnaro T.R., Stöver, D.S.M., Macdonald, M.M., Grönlund, M., Jakobsen, I. (2017). A key role for arbuscular mycorrhiza in plant acquisition of P from sewage sludge recycled to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 115, ss. 11-20.
- Malbreil, M., Tisserant, E., Martin, F., Roux, C. (2014). Advances in Botanical Research: Chapter Nine - Genomics of Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Out of the Shadows. *Advances in Botanical Research*, vol. 70, ss. 259-290.
- Manjunath, A., Hue, N.V., Habte, M. (1989). Response of *Leucaena leucocephala* to vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization and rock phosphate fertilization in an Oxisol. *Plant and Soil*, vol. 114, ss. 127-133.
- Marschner, P., Crowley D., Lieberei, R. (2001). Arbuscular mycorrhizal infection changes the bacterial 16 S rDNA community composition in the rhizosphere of maize. *Mycorrhiza*, vol. 11, ss. 297–302.
- Meharg, A.A. (2003). The mechanistic basis of interactions between mycorrhizal associations and toxic metal cations. *Mycological Research*, vol. 107, ss. 1253-1265.
- Menzies, N. (2009). *The science of phosphorus nutrition: Forms in the soil, plant uptake and plant response*. Tillgänglig: <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2009/02/the-science-of-phosphorus-nutrition-forms-in-the-soil-plant-uptake-and-plant-response> [2018-03-24]
- Miljömål.se. (2017). *Gifrfri miljö*. Tillgänglig: <https://www.miljomal.se/Miljomalen/4-Gifrfri-miljo> [2018-03-18]
- Miljömål.se. (2018). *Miljömålsrådet*. Tillgänglig: <https://www.miljomal.se/miljomalsradet> [2018-03-18]
- Morales, M.M., Comerford, N., Guerrini, I.A., Falcão, N. P. S., Reeves, J.B. (2013). Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar–soil mixtures. *Soil Use and Management*, vol. 29, ss. 306-314
- Mosse, B. (1973). Advances in the study of vesicular-arbuscular mycorrhiza. *Annual Review of Phytopathology*, vol. 11, ss. 171-196
- Multifarm Harvest. (2015). *Multiform™ P-Recovery Systems*. Tillgänglig: <http://www.multiformharvest.com/p-recovery/> [2018-03-16]
- Nagahashi, G., Douds, D. D. Jr., Abney, G. D. (1996). Phosphorus amendment inhibits hyphal branching of VAM fungus *Gigaspora margarita* directly and indirectly through its effect on root exudation. *Mycorrhiza*, vol. 6, ss. 403–408.

- Naturvårdsverket. (2013). *Hållbar återföring av fosfor*. Bromma: Naturvårdsverket (Rapport 6580). Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6580-5.pdf?pid=9620> [2018-04-30].
- Naturvårdsverket. (2017). *Cirkulär ekonomi*. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhället/EU-och-internationellt/EUs-miljoarbete/Cirkular-ekonomi> [2018-03-18]
- Nesme, T., Withers P.J.A. (2016). Sustainable strategies towards a phosphorus circular economy. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 104, ss. 259–264.
- Ordoñez, Y.M., Fernandez, B.R., Lara, L.S., Rodriguez, A., Uribe-Vélez, D., Sanders, I.R. (2016). Bacteria with Phosphate Solubilizing Capacity Alter Mycorrhizal Fungal Growth Both Inside and Outside the Root and in the Presence of Native Microbial Communities. *PLOS ONE*. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154438>
- Ostara. (2017). *NUTRIENT MANAGEMENT SOLUTIONS*. Tillgänglig: <http://ostara.com/nutrient-management-solutions/> [2018-03-16]
- Ottoson, J. (2011). Smittämnen i avloppsslam kan bli ett problem. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 257-268.
- Palm, O. (2011). Återvinning av fosfor – acceptans och konflikter. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 269-280.
- Paques. (u.å.) PHOSPAQ™. Tillgänglig: <https://en.paques.nl/products/other/phospaqa> [2018-03-16]
- Rabie, G.H. (2005). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of soil rhizosphere spiked with poly aromatic hydrocarbons. *Mycobiology*, vol. 33, ss. 41–50.
- Regeringskansliet. (2017). *Cirkulär och biobaserad ekonomi*. Tillgänglig: <http://www.regeringen.se/regeringens-politik/regeringens-strategiska-samverkansprogram/cirkular-och-biobaserad-ekonomi> [2018-03-18]
- Richardson, A.E., Hocking, P.J., Simpson, R.J., George, T.S. (2009). Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. *Crop and Pasture Science*, vol. 60, ss. 124–143.
- Roy-Bolduc, A., Hijri, M. (2011). The Use of Mycorrhizae to Enhance Phosphorus Uptake: A Way Out The Phosphorus Crisis. *Crisis. J Biofertil Biopestici* 2:104. doi:10.4172/2155-6202.1000104
- Salomon, E., Wivstad, M. (2013). *Rötrest från biogasanläggningar*. Uppsala: SLU, EPOK – Centrum för ekologisk produktion och konsumtion. Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/14640/13/salomon_e_wivstad_m_171018.pdf [2018-02-02]
- Scholz, R.W., Wellmer, F-W. (2013). Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change*. Vol. 23, ss. 11-27.
- Seleiman, M.F., Santanen, A., Kleemola, J., Stoddard, F.L., Mäkelä, P.S.A. (2013). Improved sustainability of feedstock production with sludge and interacting mycorrhiza. *Chemosphere*, vol. 91, ss. 1236-1242.
- Selinus, O. (2011). Teknik och ekonomi avgör fosfortillgångarnas livslängd. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 39-54.
- Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M., Smith, F.A. (2011). Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. *Plant Physiology*, vol. 156, ss. 1050–1057.
- Smith, S.E., Read, D.J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3. uppl. San Diego: Academic Press.
- Smith, S.E., Smith, F.A., Jakobsen, I. (2004). Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake. *New Phytologist*, vol. 162, ss. 511-524.
- Sternbeck, J. (2011). Organiska föroreningar i slam ingen akut fara. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 39-54.
- Söderhäll, I. (2011). Livsviktigt ämne med risk för brist. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 25-38.
- Tarafdar, J.C., Marschner, H. (1994a). Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 26, ss. 387-395.
- Tarafdar, J.C., Marschner, H. (1994b). Efficiency of VAM hyphae in utilisation of organic phosphorus by wheat plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, vol 40, ss. 593-600.
- Teng, Y., Luo, Y., Sun, X., Tu, C., Xu, L., Liu, W., Li, Z., Christie, P. (2010). Influence of arbuscular mycorrhiza and Rhizobium on phytoremediation by alfalfa of an agricultural soil contaminated with weathered PCBs: a field study. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 12, ss. 516–533.

- Tibbett, M. (2000). Roots, Foraging and the Exploitation of Soil Nutrient Patches: The Role of Mycorrhizal Symbiosis. *Functional Ecology*, vol. 14 ss. 397-399.
- Tideström, H. (2011). Teknik för fosforåtervinning ur avlopp – framtidsutsikter i Sverige. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 307-319.
- Tidåker, P (2011). Kretsloppet i jordbruket kan förbättras. I: Johansson, B (red), *Återvinna fosfor - hur bråttom är det?*. Stockholm: Edita Västra Aros AB, ss. 163-175.
- Tullio, M., Pierandrei, F., Salerno, A., Rea, E. (2003). Tolerance to cadmium of vesicular arbuscular mycorrhizae spores isolated from a cadmium-polluted and unpolluted soil. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 37, ss. 211–214
- USGS. (2018). *Mineral commodity summaries 2018*. [Broschyr]. Reston, VA: USGS,. Tillgänglig: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> [2011-02-11]
- UNEP, IFA. (2001). *Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining*. [Broschyr]. Paris: UNEP, IFA. Tillgänglig: <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8071/-Environmental%20Aspects%20of%20Phosphate%20and%20Potash%20Mining-20011385.pdf> [2018-03-16]
- Van Geel, M., De Beenhouwer, M., Ceulemans T., Caes K., Ceustermans, A., Bylemans, D., Gomand, A., Lievens, B., Honnay, O. (2016). Application of slow-release phosphorus fertilizers increases arbuscular mycorrhizal fungal diversity in the roots of apple trees. *Plant and Soil*, vol. 402, ss. 291–301
- Verdin, A., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Fontaine, J., Grandmougin-Ferjani, A., Durand, R. (2006). Effects of anthracene on development of an arbuscular mycorrhizal fungus and contribution of the symbiotic association to pollutant dissipation. *Mycorrhiza*, vol. 16, ss. 397–405.
- Vestberg, M. (1992). The effect of growth substrate and fertilizer on the growth and vesicular-arbuscular mycorrhizal infection of three hosts. *Agricultural Science in Finland*, vol. 1, ss. 95-105.
- Vitousek, P.M., Porder, S., Houlton, B.Z., Chadwick, O.A. (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological applications*, Volume20, ss. 5-15.
- Wamberg, C., Christensen, S., Jakobsen, I. (2003). Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiology*, vol. 133, ss. 16-20.
- Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W., Rillig, M.C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanism, *Plant and Soil*, vol. 300, ss. 9–20.
- Weissenhorn, I., Glashoff, A., Leyval, C., Berthelin, J. (1994). Differential tolerance to Cd and Zn of arbuscular mycorrhizal (AM) fungal spores isolated from heavy metal-polluted and unpolluted soils. *Plant and Soil*, vol. 167, ss. 189–196.
- Weissenhorn, I., Leyval, C., Belgy, G., Berthelin, J. (1995). Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil. *Mycorrhiza*, vol. 5, ss. 245–251.
- Weissenhorn, I., Mench, M., Leyval, C. (1995). Bioavailability of heavy metals and arbuscular mycorrhiza in a sewage-sludge-amended sandy soil. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 27, ss. 287-296.
- Wentzel, S., Joergensen, R.G. (2016). Effects of biogas and raw slurries on grass growth and soil microbial indices. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 179, ss. 215-222.
- Werner G.D., Kiers E.T. (2014). Partner selection in the mycorrhizal mutualism. *New Phytologist*, vol. 205, ss. 1437–1442.
- Widada, J., Damarjaya, D.I., Kabirun, S. (2003). The interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria on the growth and nutrients uptake of sorghum in acid soil. I: Velázquez E., Rodríguez-Barrueco C. (red). *First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. Developments in Plant and Soil Sciences*, vol 102. Springer, Dordrecht, ss. 173-177.
- Widén, M., & Widén, Björn. (2008). *Botanik: Systematik, evolution, mångfald*. 1:1. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Wivstad, M., Salomon, E., Spångberg, J., Jönsson, H. (2009). *Ekologisk produktion – möjligheter att minska övergödning*. [Broschyr]. Uppsala: Centrum för uthålligt lantbruk, SLU. Tillgänglig: <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/epok/aldre-bilder-och-dokument/publikationer/eko-prod-overgodning-syntes-web.pdf> [2018-02-10]
- Wu, N., Zhang, S., Huang, H., Shan, X., Christie, P. & Wang, Y. (2008). DDT uptake by arbuscular mycorrhizal alfalfa and depletion in soil as influenced by soil application of a non-ionic surfactant. *Environmental Pollution*, vol. 151, ss. 569–575.
- Wu, N., Huang, H., Zhang, S., Zhu, Y.G., Christie, P. & Zhang, Y. (2009). Phenanthrene uptake by *Medicago sativa* L. under the influence of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Environmental Pollution*, vol. 157, ss. 1613-1618.

- WWF, 2010. *Kraftig algbloomning minskar syret och ger döda bottnar i Östersjön*. Tillgänglig: <http://www.wwf.se/press/pressrum/pressmeddelanden/1298384-kraftig-algbloomning-minskar-syret-och-ger-doda-bottnar-i-ostersjon> [2018-02-11]
- Yao, Y., Gao, B., Chen, J., Yang, L. (2013). Engineered Biochar Reclaiming Phosphate from Aqueous Solutions: Mechanisms and Potential Application as a Slow-Release Fertilizer. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, ss. 8700–8708.
- Ye, S., Yang, Y., Xin, G., Wang, Y., Ruan, L., Ye, G. (2015). Studies of the Italian ryegrass–rice rotation system in southern China: Arbuscular mycorrhizal symbiosis affects soil microorganisms and enzyme activities in the *Lolium mutiflorum* L. rhizosphere. *Applied Soil Ecology*, vol. 90, ss. 26-34.
- Yousefi, A.A., Khavazi, K., Moezi, A.A., Rejali, F., Nadian, H.A (2011). Phosphate Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Impacts on Inorganic Phosphorus Fractions and Wheat Growth. *World Applied Sciences Journal*, vol. 15, ss, 1310-1318.
- Zaefarian, F., Rezvani, M., Ardakani, M.R., Rejali, F., Miransari, M. (2013). Impact of Mycorrhizae Formation on the Phosphorus and Heavy-Metal Uptake of Alfalfa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 44, ss. 1340-1352.
- Zhang, L., Xu, M., Liu, Y., Zhang, F., Hodge, A., Feng, G. (2016), *Carbon and phosphorus exchange may enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing bacterium*. *New Phytologist*, vol. 210, ss. 1022–1032.
- Zhou, X., Zhou, J. & Xiang, X. (2013). Impact of four plant species and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in spiked soil. *Pol. J. Environ. Stud*, Vol. 22, ss.1239-1245.
- Ågren, G.I., Wetterstedt, J.Å.M., Billberger, M.F.K. (2012). Nutrient limitation on terrestrial plant growth – modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. *New Phytologist*, vol. 194, ss. 953-60.