

Inledning

Att producera tillräckligt med mat för jordens växande befolkning bli allt viktigare. Matöverskotten är borta och åkermarksarealen är begränsad. En ökad avkastning per hektar är en förutsättning för att klara livsmedelsförsörjningen, vilket bl. a. förutsätter en effektivare användning av gödselmedel och återvinning av växtnäringsämnen. I detta kapitel ges en överblick av villkoren och möjligheter att återvinna fosfor, ett viktigt växtnäringsämne, ur städernas avfall för att uppnå recirkulation.

Råfosfatförekomster samt anrikning med kadmium och uran

Cirka 80% av råfosfat som bryts används för att tillverka fosforgödsel, resterande används för tvättmedel (12%), djurfoder (5%) och andra användningsområden (3%). Den globala produktionen av råfosfat uppgick till ca 170 miljoner ton 2010. Hur länge befintliga fosforreserver kommer att räcka är svårt att beräkna. Enligt den senaste uppdatering från US Geological Survey (UDGS) beräknas livslängden för kända reserver uppgår till ungefär 350 år baserad på nuvarande produktionskapacitet. Tidigare angavs 80-90 år. De utökade fosforresurser beror på att, vilket visar att prognoser kan vara mycket osäkra.

I de flesta råfosfatfyndigheterna finns oönskade tungmetaller såsom kadmium och uran särskilt om fyndigheter är av sedimentärt ursprung. Koncentrationer kan vara så höga som 640 mg kadmium och 1,3 gram uran per kilo fosfor. Få fosforfyndigheter har låga kadmiumhalten (Fig. 1). Marockansk råfosfat, som står för 85% av världens kända fosfatreserver, har en kadmiumhalt som varierar mellan 80-240 mg Cd per kg fosfor. Med dagens gödseltillverkning följer det mesta (85-90%) av kadmium och uran med i slutprodukten.

Året 2009 sänkte den europeiska myndigheten för livsmedelssäkerhet (EFSA) det rekommenderade tolerabla veckointag av kadmium från 7 till 2,5 mikrogram per kilo kroppsvikt, baserat på nya medicinska uppgifter om kadmiums toxicitet för människor. Flera länder har därför begränsningar för kadmiumhalter i fosfatgödselmedel för att garantera en säker livsmedelsproduktion. En beräkning för svenska förhållanden visar att kadmiumhalten inte få överstiga 10 mg Cd per kilo fosfor för att undvika en anrikning av åkermark (Fig. 2).

Trender och problem

Man kan identifiera två trender i världen som kommer att påverka jordbruksproduktionen och användningen av växtnäringsämnen i framtiden - befolkningstillväxt och urbanisering. Mellan 1950 och 2009 ökade befolkningen från 2,5 till 6,8 och förväntas nå 9,1 miljarder 2050.

Befolkningstillväxten förväntas ske främst i tätorter. Statistiken visar att 1,4 miljarder människor bor i 600 städer med en genomsnittlig befolkning på 2,3 miljoner per stad. Urban tillväxt har resulterat i centra för konsumtion och därmed ackumulering av mänskligt avfall. Stora jordbruksarealer långt bort från städerna krävs för att försörja människor. Odlingsmarkens växtnäringskapital tas bort från fälten och hamnar via livsmedel i toalettavfall och organiskt hushållsavfall och sedan i avloppsslam, kompost eller rötrest. För att uppnå verklig recirkulation och undvika en överbelastning av åkermark med näringsämnen i städernas närområde behöver avfallet transporteras tillbaka till den odlade arealen.

Kommunalt organiskt avfall har dock normalt en hög vattenhalt och ett lågt näringsinnehåll (se Tabell 1). Till exempel innehåller avvattnat avloppsslam 70-80% vatten och det totala innehållet av fosfor är högst 3% av torrsubstansen. Avfallsvolymer som ska återföras är större än volymen av de skördade grödor. Det innebär att returtransport av avfall blir dyr och istället förbränns avloppsslam i de flesta större städer varvid volymen kan minskas med 90%. Gödsling med avloppsslam har dock minskat kraftigt i många länder på grund av oviljan hos jordbrukare att använda avloppsslam, som är kritiska till innehållet av tungmetaller och organiska miljögifter. I enstaka europeiska länder, t.ex. Schweiz, är användning av avloppsslam på jordbruksmark helt förbjuden. Dessutom har deponering av organiskt material varit förbjudet i EU-länderna sedan 2005. Som en konsekvens förbränns alltmer avloppsslam. Askan har höga tungmetallhalter, dess fosforinnehåll är inte växttillgänglig och deponeras därför. I Japan bränns idag 100% av slammet, inom EU 30% och i USA 20%. Eftersom askan deponeras har ett flöde av fosfor från odlingsmarken via städer till deponi blivit allt vanligare.

Förutsättningar för en effektiv fosforåtervinning

Ett av Riksdagen beslutade miljömål är att återcirkulera avfallets växtnäringsämnen tillbaka till jordbruksmark. För att uppnå detta har ett antal åtgärder vidtagits bl a för att få fram "säkrade och rena avfall" lämpliga för recirkulation. Till exempel har deponering av organiskt material förbjudits inom EU. För att minska höga halter av oönskade metaller (t.ex. kadmium, kvicksilver) har användningen förbjudits eller begränsats kraftigt. Industrier anslutna till reningsverk har varit tvungna att minimera sina utsläpp. Källseparering av hushållsavfall har införts för att kunna producera kompost med så få föroreningar som möjligt. Dessa ansträngningar har förbättrat kvaliteten i kommunalt avfall. Till exempel har kadmiumhalten i avloppsslam i Sverige minskat från flera hundra milligram för några decennier till endast 20-40 mg Cd per kilo fosfor idag.

Det är dock tveksamt om dessa lofvärda förbättringar kommer att leda till en omfattande användning av tätortsavfall på åkermark med tanke på att ett antal villkor måste vara uppfyllda för att uppnå en uthållig recirkulation. I Tabell 2 sammanfattas de viktigaste villkor som bör uppfyllas för att få till stånd ett varaktigt växtnäringsflöde från bord till jord: (i) säker och ren avfall utan miljörisk (avser innehåll av metaller, organiska föroreningar och patogener); (ii) hög växttillgänglighet av näringsämnen med en betydande gödselverkan (om näringsämnena är bundna i mindre lösliga eller olösliga former kommer avfall inte kunna ersätta mineraliska gödselmedel; och (iii) mängden växtnäringsämnen som återförs till åkermark genom avfall måste relateras till bortförel med grödan ("ersättningsprincipen" bör följas och tillförel av stora mängder undvikas). Detta skulle innebära långväga transporter för att undvika en anrikning av näringsämnen i åkermark som omger städer.

Möjligheter för fosforåtervinning från toalettavfall

Det finns fyra huvudsakliga alternativ för återvinning av fosfor från toalettavfall: a) sprida avloppsslam på åkermark, b) separera humanurin från avföring i speciella toaletter och använda urin som gödselmedel, c) att återvinna fosfor ur avloppsvatten i reningsverk, och d) att återvinna fosfor från askan efter förbränning av avloppsslam. Varje alternativ har för- och nackdelar och det lämpligaste valet beror på rådande betingelser, vilket diskuteras nedan.

Att sprida avloppsslam på åkermark

Fördelen med att spridning av avloppsslam på åkermark är att det mesta av fosfor i toalettavfallet kan återföras till åkermark då mer än 90% av fosfor som kommer till ett modernt reningsverk hamnar i slammet. Därutöver återförs ca 20% av kvävet i avloppsvattnet samt organiskt material med avloppsslam till marken. En stor nackdel med fosforrecirkulation via avloppsslam är att stora mängder slam skall hanteras, framförallt slam som produceras i städer som har begränsat åkerareal

inom ett rimligt transportavstånd. Ytterligare en nackdel är att avloppsslam innehåller höga halter av föroreningar (metaller, organiska föreningar, patogena organismer, läkemedelsrester, virus, etc.). En ytterligare nackdel är att fosfor i slam till största delen är bunden till järn eller aluminium eftersom man faller fosfor från avloppsvatten med fällningskemikalier innehållande dessa metaller. Järn- och aluminiumfosfater har mycket låg vattenlöslighet och växttillgängligheten av fosfor är låg, dvs växtnäringsvärdet är lågt.

Urinseparering

Av växtnäringsämnen i avloppsvatten härstammar ca 75% av kvävet och ca 50% av fosfor och kalium ifrån urin. Urinens sammansättning är lämpligt som gödselmedel. Problemet med att recirkulera växtnäring via urin är att urin är en mycket utspädd lösning, fosforhalten är i medel 0,05% och varierar mellan 0,36 till 0,67 gram fosfor per liter. Det innebär att man behöver transportera och sprida 1 500 – 3 000 liter urin för att tillföra ett kilo fosfor till en hektar åkermark. Eftersom spridning endast kan ske under en mycket begränsad del av året, krävs det att urin kan lagras under större delen av året före transport. Att till exempel separera urin från London (ca 12 miljoner invånare) skulle innebära lagring och transport av ca. 6,5 miljoner kubikmeter urin per år, dvs motsvarande 1 300 olympiska simbassänger för lagring. För transport skulle det debövas 165 000 lastbilar med släp (40 tons lastkapacitet) under en period av ca 3 månader.

Så fort urin har lämnat människan sker en enzymatisk nedbrytning av urea till ammoniak varvid bikarbonat och hydroxyljoner bildas vilket leder till höga pH-värden i urin. Höga pH värden leder till utfällningar av fosfatsalter (struvit, kalciumfosfat, etc.) Utfällningar leder till blockeringar i rör och lagringstankar. Det är därför svårt att transportera urin i rör över längre avstånd för att undvika ingensättning. En nyligen genomförd studie visade att ca 45% av fosfor i urin faller ut i lagringstankar. Andra nackdelar med urinseparering är kravet på ett separat rörsystem, användning av speciella toaletter, stora förluster av kväve genom ammoniakavdunstning samt eventuell kontaminering med läkemedelsrester.

En viktig detalj som man bör beakta i sammenhanget är att urinseparering ändå kräver reningsverk för att andra komponenter i avloppsvatten såsom fäkalier, gråvatten från tvätt, disk och bad samt industriellt avloppsvatten. Trots urinsortering kommer hälften av fosfor fortfarande att finnas i avloppsvattnet och hamnar i avloppsslammet.

Sammantaget kan man konstatera att urinseparering endast kan fylla en funktion i mindre orter, i landsbygd och platser som saknar infrastruktur för reningsverk (t.ex. i utvecklingsländer) och där jordbruksmark finns anslutning till bebyggelsen.

Fosforåtervinning från avloppsvatten

Fosforåtervinning från avloppsvatten genomförs genom kemisk utfällning av fosfor i reningsverkets interna strömmar. Fosforprodukterna är kalciumfosfat eller struvit (magnesium-ammonium-fosfat) utan blandning med organiskt material. Kalciumfosfat är samma typ av förening som råfosfat som används i fosforindustrin och kanförädlas industriellt. Struvit däremot kan inte behandlas i fosforindustrin men kan användas som ett långsamverkande fosforgödselmedel. Den största nackdelen med att återvinna fosfor direkt från avloppsvatten är att endast vattenlöst fosfor kan utvinnas. Det betyder att endast 20-60% av den totala fosfor i avloppsvatten kan återvinnas. Ytterligare en nackdel med fosforåtervinningen från avloppsvatten är att kostnaden för kemikalier som krävs för fosforfällning överstiger värdet av de återvunna fosforprodukterna (struvit eller kalciumfosfat).

Fosforåtervinning från avloppsslam via aska

Avloppsslam innehåller minst 95% av fosfor som kommer in till ett modernt reningsverk. Till exempel har Käppala reningsverk i Stockholm en fosforreningseffektivitet på 97%. För att reducera de stora mängder avloppsslam som produceras används förbränning, dock ej i Sverige ännu. I Europa förbränns idag ca 40% av allt avloppsslam och andelen slam som förbräns ökar hela tiden

pga svårigheten med avsättning av de stora volymerna. Förbränning av avloppsslam sker vid en temperatur om 800-900°C och så gott som all fosfor blir kvar i askan. Halterna av fosfor i aska från förbränning avloppsslam varierar mellan 7 och 13% (av vikten) och är endast något lägre än fosforinnehållet i fosfatmalm (12-16% av vikten) som används för produktion av fosforprodukter. Aska ifrån förbränt avloppsslam är alltså en koncentrerad fosforkälla.

Flera processer har provats/utvecklats för att återvinna fosfor ur aska från förbränt avloppsslam. Ett vanligt förfarande är att laka fosfor ur askan med hjälp av en syra, ofta följt av utfällning som järnfosfat eller aluminiumfosfat. Dessa produkter har dock en låg effektivitet som gödselmedel eftersom vattenlösligheten är mycket låg.

Andra metoder som provats är upplösning med syra varvid nästan all fosfor frigörs och med basiska lösningar varvid endast ca 50% av fosfor i askan går i lösning. Fosfor kan också återvinnas från aska med termiska processer där aska upphetas till 1400 ° C så att fosfor förångas varefter gasen behandlas med vatten varvid fosforsyra bildas. Effektiviteten av denna metod är dock begränsad då fosfor reagerar och bildar slaggämnen vid uppvärmning. En annan termisk process, utvecklad av företaget AshDec (Österrike), syftar till att avlägsna tungmetaller från slamaskan och sedan att använda askan som gödselmedel (tekniken ägs numera av finska Outotec). Upphetning av slamaska för att avdunsta fosfor eller tungmetaller kräver stora mängder energi och dessutom kan bara en del av dessa ämnen förångas. En ny lönsam process för produktion av fosforgödselmedel (ammoniumfosfat) från olika fosforråvaror (slamaska, aska från kött- och benmjöl, mm) har utvecklats av företaget EasyMining Sverige AB. Tekniken som är resurseffektiv kallas CleanMAP® Technology och möjliggör framställning av rena vattenlösliga fosforgödselmedel oberoende av kvaliteten på fosforråvaran. Processen är också applicerbar i gödselmedelsindustrin och medför att kadmium och uran avskiljs och inte hamnar i gödselmedel.

Fosforcykeln i samhället kan slutas - förbränning av avloppsslam samt gödselproduktion från askan

Som nämnts ovan innebär den ökade urbaniseringen att det ackumuleras näringsämnen och metaller i städer som kan orsaka obalanser. Idag hanteras avfall i megastäder genom delåtervinning, förbränning och deponering. Och att återföra växtnäringsämnen till odlingsmark genom återvunnet organiskt avfall är inget realistiskt alternativ längre. Ökad förbränning av avloppsslam, inte bara i mega- utan även i medelstora städer, innebär att spridning av avloppsslam på åkermark kommer att minska. Allt tyder på att aska kommer att vara den huvudsakliga restprodukten från större städer i framtiden. Bearbetning av aska och utvinning av näringsämnen blir därför ett viktigt steg i syfte att sluta samhällets fosforkretslopp (Fig. 2).

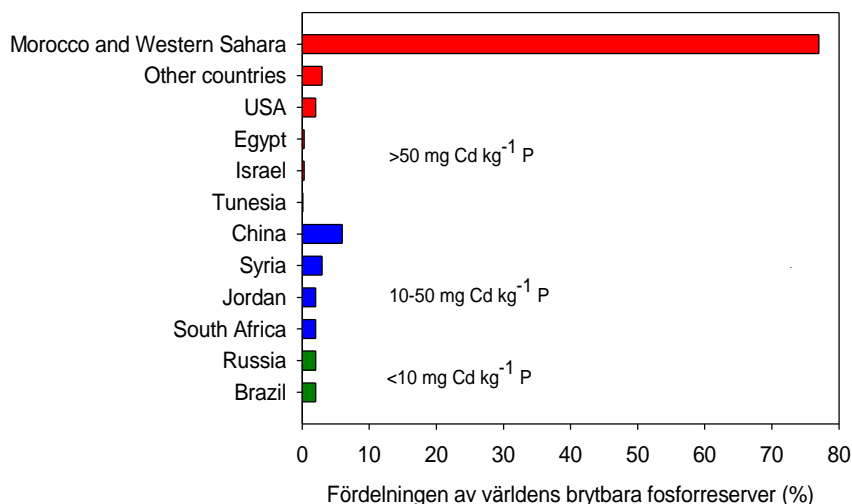
Utblick

Att kunna återvinna fosfor som finns i samhällets avfall och återföra den till åkermarken är en nyckelfråga för en hållbar utveckling. Med hänsyn taget till de svårigheter och villkor som beskrivs ovan, verkar recirkulation av fosfor utvunnet ur kommunalt avfall snarare än återförsel av organiskt avfall till åkermark en framtida väg för att uppnå en effektiv och fungerande redistribution. Ett sätt är att bränna fosforrika avfall och utvinna vattenlösliga, rena fosforgödselmedel ur askan. Genom produktion av högkoncentrerade fosforgödselmedel minskas transportbehovet och fosfor kan recirkuleras till hela den svenska åkermarken. Det återvunna fosforgödselmedlet bör vara vattenlösligt, innehålla växttillgängliga näringsämnen med samma gödselvärde som mineralgödsel. Fosforgödselmedel som produceras genom utvinning ur aska kan ersätta en del av fosforgödselmedel utvunna ur apatit vilket möjliggör att en hållbar och säker livsmedelsproduktion kan upprätthållas. Trenden att mer kommunalt avfall förbräns är helt i linje med detta synsätt.

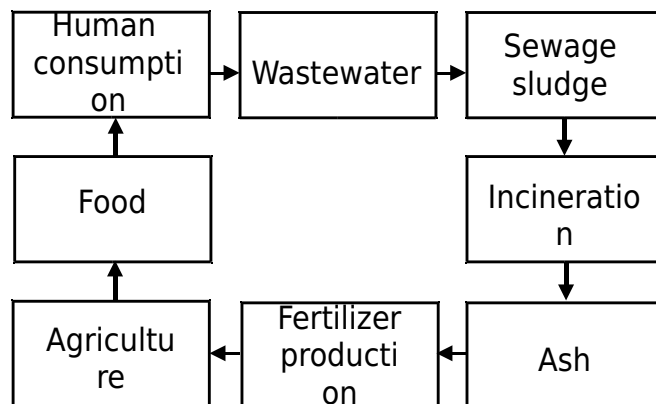
Vi tror att avfall kommer att kunna ersätta värdefulla råvaror i betydligt större grad i framtiden och att den tekniska utveckling inom området kommer att leda till en mer hållbar växtnäringshantering i samhället. Kännetecknen kommer att vara effektiva processer och rena produkter av hög kvalitet.

Förbränning av stallgödsel förekommer numera i regioner med mycket intensiv djurhållning där mycket stora volymer överstiger spridningskapaciteten på åkermark.. Fosfor och kalium kan utvinnas ur askan från förbränt stallgödsel. Aska från kycklinggödsel kan t. ex. innehålla upp till 10% fosfor och 8% kalium. Företaget Kommunekemi AS (Danmark) har utvecklat en process för framställning av ren kaliumgödselmedel (kaliumklorid eller sulfat) från halmaska. Både fosfor och kalium är viktiga att återvinna då dessa växtnäringssämnen idag utvinns genom brytning av icke förnybara mineraler. Innan kalium utvanns genom brytning av mineraler så kom kalium i själva verket från aska. Begreppet "pottaska", som ofta används för kaliuminnehållande mineraler, härstammar från den gamla metoden där vedaska utlakades och där laktlösningen sedan avdunstades i stora järngrytor för att få kaliumkarbonat.

Halten av kalium i avloppsslam är dock mycket låg (0,1% av torrsubstans i aktivt slam), eftersom kalium är vattenlösligt och inte hamnar i slammet. Återvinning av kalium från slamaska är därför inte relevant. Av det kväve som finns i avloppsvatten hamnar ca 20% av kvävet i avloppsslamet. Kvävet kan inte återvinnas om avloppsslam förbränns, eftersom under slam förbränning kvävet i organiskt material oxideras till kvävgas och återförs till luften. Kväve är inte en begränsad resurs som fosfor eller kalium, eftersom det utvinns ur luften (luft innehåller ca. 78% kväve). Det kväve som förloras under förbränning av avloppsslam har dock liten betydelse för näringsförsörjningen till jordbruket. Det avloppsslam som produceras i Sverige varje år innehåller runt 5 000 ton kväve, vilket motsvarar ca 2 kg per hektar åkermark vilket skall jämföras med grödornas behov av kväve som är mellan 80 och 150 kg per hektar och år. Vid slamförbränning oxideras organiskt material till koldioxid men eftersom slam är förnybar biomassa är det ett koldioxidneutralt bränsle. När det gäller organiskt material som förloras vid förbränningen motsvarar det (för Sverige) ca 48 kg/ha vilket skall jämföras med de ca 2 000 kg/ha som återförs via skörderester varje år. Slutsatsen är att det vid förbränning av avloppsslam inte sker en stor förlust av värdefulla resurser. Det är alltså viktigast att kunna återvinna fosfor ur avloppsslam vilket kan ske genom att förbränna slammet och utvinna fosfor ur askan.



Figur. 1. US Geological Surveys uppskattningar av mängder brytbar råfosfat/apatit i världen och dess innehåll av kadmium. Kadmiumhalten i den marockanska råfosfaten varierar mellan 80 och 240 mg Cd kg⁻¹ s.



Figur. 2. Genom att förbränna avloppsslam därefter utvinna näringsämnen och producera gödselmedel ifrån askan kan näringskretsloppet samhället slutas.

Tabell 1. Förutsättningar för att uppnå en hållbar återrecirkulation av näringsämnen från samhället åkermark.

Villkor för effektiv näringsrecirkulation

Ingen negativ effekt på livsmedelskvalitet och miljö

Låga nivåer av oönskade metaller

Låga nivåer av organiska föroreningar

Låga nivåer av läkemedel

Låga nivåer av patogener

Effektiv näringsstillförsel

Hög anläggningens tillgänglighet

Låg växtnäringsförlusterna

Fördelning och spridning på all åkermark

Långsiktiga transport

Energisparande jämfört med mineralgödsel används

Tabell 2. Jämförelse av fosforinnehållet i olika avfall med mineralgödsel (ammoniumfosfat)

	Fosforinnehåll %	Fosforinnehåll gram P / kilo	Mängd material kg / kg P
Avloppsvatten	0,001	0,01	100 000
Urin	0,05	0,5	2 000
Kompost	0,15	1,5	667
Avloppsslam	1	10	100
Aska (förbränt avloppsslam)	9	90	11
Ammoniumfosfat (MAP)	22	220	4,5