

Metoder för fosforåtervinning ur avloppsslam

Erik Levin, KTH
Kåre Tjus, Uwe Fortkamp, Mats Ek, Christian Baresel, IVL
Svenska Miljöinstitutet
Emilie Ljung, Ola Palm, SP-JTI

B2184
April 2014

Denna rapport är delfinansierad inom ramen för det av Vinnova finansierade projektet "Morgondagens kommunala vattenrening – en produktionsanläggning för nyttigheter"

Rapporten godkänd:
2014-05-20



John Munthe
Forskningschef

Organisation IVL Svenska Miljöinstitutet AB	Rapportsammanfattning
Adress Box 21060 100 31 Stockholm	Projekttitel Morgondagens kommunala vattenrening— en produktionsanläggning för nyttigheter
Telefonnr 08-598 563 00	Anslagsgivare för projektet Vinnova
Rapportförfattare Erik Levin, Kåre Tjus, Uwe Fortkamp, Mats Ek, Christian Baresel, Ola Palm, Emilie Ljung	
Rapporttitel och undertitel Metoder för fosforåtervinning ur avloppsslam	
Sammanfattning <p>Fosfor är en globalt begränsad resurs som är viktig som näringsämne för livsmedelsförsörjningen. Kommunalt avloppsvatten innehåller stora mängder fosfor som idag inte återvinns och reningsprocessen är därmed att betrakta som en sänka för denna viktiga resurs.</p> <p>I denna rapport presenteras en utredning av status för tekniker och för återvinning av fosfor från kommunal avloppsvattenrening och vilka kostnader en återvinning medför.</p> <p>För återvinningen är användbarheten av den återvunna fosforprodukten grundläggande, vilket till stora delar är beroende av i vilken grad fosforprodukten kan renas från tungmetaller. Värdet av fosforprodukten bestäms dels av användbarheten för gödsling, dels av om den kan användas som råvara i fosfatindustrin. Det högsta ekonomiska värdet har produkter som är identiska med de fosforprodukter som idag tillverkas av fosfatindustrin och därmed har ett högt förädlingsvärde och stor efterfrågan..</p> <p>En mängd tekniker för fosforåtervinning har utvecklats och finns i allt från idéstadium och prototyp till drift i full skala. Kostnaderna varierar men är ofta höga i jämförelse med produktion av jungfrulig fosfor. Förutsättningar är också olika som t.ex. skala för rimlig ekonomisk drift. I storskaliga anläggningar med slamförbränning synes rening av askan från tungmetaller och användning av askan som gödning vara en ekonomiskt tillämpbar teknik.</p> <p>Vid utvärdering av tekniker för återvinning av fosfor från kommunal vattenrening bör ett flertal faktorer tas hänsyn till. Kostnaden för upparbetning bör t.ex. vägas mot kostnaden för omhändertagande av slam. Viktiga är också krav på renhet, t.ex. halt av tungmetaller som kadmium. Det är därför viktigt att belysa de alternativa behandlingsmetoderna ur ett systemperspektiv och utifrån det perspektivet vidare utveckla metoderna.</p>	
Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren Fosfor, reningsverk, slam, återvinning, aska, gödsel, Phosphorus, wastewater treatment plant, sludge, recycling, ash, fertilizer	

Bibliografiska uppgifter

IVL Rapport B2184

Rapporten beställs via

Hemsida: www.ivl.se, fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm

Innehållsförteckning

Bakgrund.....	2
Råfosfat – tillgång, brytning och konsumtion	2
Aktuella aktiviteter.....	2
Naturvårdsverkets regeringsuppdrag: <i>Hållbar återföring av fosfor</i>	3
P-REX (EU-projekt, FP7).....	3
RecoPhos (EU-projekt, FP7).....	4
Slambränsleblandningar – Förbränning och fosforutvinning (Waste Refinery, 2013)....	4
Konferenser och The European Phosphorus Platform	5
Nyhetsbrev	5
Exempel på Fosforåtervinning i Japan	5
Användning som gödselmedel.....	6
Fosfors växttillgänglighet	6
Vad önskar jordbruket och skogsbruket?.....	6
Gödselmedel för lantbruket	7
Gödslingsrekommendationer.....	7
Kadmium	8
Metoder för fosforavskiljning och återvinning.....	8
Utgångsmaterial för återvinning av fosfor	8
Sammanställning av metoder för fosforåtervinning	10
Separation av tungmetaller	12
Fosforprodukter.....	12
Fosforsyra	13
Struvit	13
Kalciumfosfat (apatit och hydroxylapatit).....	14
Natriumfosfat	15
Ammoniumfosfat	15
Järn- och aluminiumfosfat.....	15
Bedömning av kostnad för fosforåtervinning	16
Kostnad för fosfor ur fosfatmineral	16
Kostnad för olika kommersiella processer.....	17
Utvärdering av kostnad för lakning med syra och bas	18
Diskussion.....	22
Referenser	23
Bilaga 1 Sammanställning över tekniker och slutprodukter för fosforåtervinning	26

Bakgrund

Fosfor är en begränsad resurs, som samtidigt är viktig som näringsämne för livsmedelsförsörjningen. Fosfor utgör också en viktig del i kommunalt avloppsvattenslam. Idag är återvinningen av fosfor ur slammet begränsad. I flera länder är det förbjudet att använda slam för gödsling. Det finns därför ambitionen och regeringsförslag för mål som ökar återföring av fosfor till jordbruksmark.

Den här rapporten belyser status för tekniker och kostnader för återvinning av fosfor från kommunal avloppsvattenrening. Förutom tekniken för återvinning är också slutprodukten, dvs. i vilken form fosfor återvinns av betydelse, då olika former har olika kvalitet för återanvändning i jordbruksanvändning, vilket också tas upp i rapporten.

Den här rapporten utgör en del i projektet Morgondagens kommunala Vattenrening, ett projekt som är delfinansierat av Vinnova.

Råfosfat – tillgång, brytning och konsumtion

År 2012 var världens uppskattade råfosfatreserver ca.67 miljarder ton, vilket i stort sett är den samma som för år 2011 (USGS, 2013). Störst reserver finns i Marocko och Västra Sahara (total uppskattning ca.50 miljarder ton). Som ekonomiskt brytvärd fosfatmineral räknas enbart apatit, kalciumfosfat av tillräcklig renhet och koncentration. Den ekonomiskt brytvärda mängden fosfatmineral uppskattas till ca $1,2 \times 10^{10}$ ton fosfor (Zapata och Roy, 2004), av en total mängd fosfatmineral i marken på 4×10^{15} ton fosfor (Butcher m fl, 1992). Järnfosfat, som förekommer i rikligare mängd i naturen än kalciumfosfat, kräver en annan och mer komplicerad och därmed dyrare process för att kunna användas som råvara i fosfatindustrin och är därmed inget intressant fosfatmineral.

Råfosfatbrytningen för år 2012 uppgick till 210 miljoner ton, vilket var en rekordhög siffra (198 miljoner ton år 2011). Världens ledande land för brytning av råfosfat har under de senaste två åren varit Kina (89 miljoner ton år 2012) följt av USA (29,2 miljoner ton år 2012) och Marocko (28 miljoner ton år 2012).

Världskonsumtionen av fosfat (P_2O_5) beräknas öka från 41,9 miljoner ton år 2012 till 45,3 miljoner ton år 2016 (USGS, 2013).

De begränsade reserverna i samband med ökade fosforpriser gör det mer angeläget att återvinna fosfor.

Aktuella aktiviteter

Både nationellt och internationellt pågår aktiviteter för att undersöka möjligheter och tekniker för återvinning av fosfor. En kort sammanställning av några aktiviteter följer här.

Naturvårdsverkets regeringsuppdrag: **Hållbar återföring av fosfor**

Naturvårdsverket har som uppdrag av Miljödepartementet att göra en kartläggning av olika fosforresurser i Sverige.

I regeringsuppdraget ingår följande delar:

- Kartläggning av fosforresurser och fosforflöden i samhället
- Bedömning av potential för hållbar återföring
- Förslag till författningskrav
- Etappmål för hållbar återföring av fosfor

För att genomföra uppdraget kring hållbar återföring av fosfor har ett antal underlagsrapporter tagits fram. Regeringsuppdraget slutrapporterades i september 2013 (Naturvårdsverket, 2013). Som etappmål föreslås att senast 2018 skall minst 40 % av fosfor i avlopp tas tillvara och återföras som växtnäring till åkermark utan att detta medför en exponering för föroreningar som riskerar att vara skadlig för människor eller miljö.

P-REX (EU-projekt, FP7)

P-REX¹ (*Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency*) är ett forsknings- och demonstrationsprojekt som genomförs inom EU:s sjunde ramprogram. Projektet, som pågår under 36 månader (2012-09-01 - 2015-08-31), har ett konsortium bestående av 15 partners från sju olika länder.

P-REX har följande mål:

- Demonstration av nya, och tillgängliga, tekniska lösningar/processer för fosforåtervinning i fullskala.
- Utvärdering och validering av teknikernas prestanda samt av kvaliteten på erhållna återvinningsprodukter utifrån anläggningens tillgänglighet av fosfor.
- Analys av marknadshinder och marknadspotential för ny teknik och nya produkter.
- Utveckling av strategier och rekommendationer för effektiv och utbredd fosforåtervinning
- Implementering av fosforåtervinning från avloppsvattenströmmar utifrån regionala förutsättningar och efterfrågan.

Projektet byggs upp av fem olika arbetsområden (samt 14 arbetspaket):

- Demonstration och utvärdering av
 - teknik för fosforåtervinning från aska
 - teknik för fosforåtervinning från slam (vattenfas)
 - slamspridning på åkermark (inkl. lösningar för att minska slammets toxicitet)

¹ Projekthemsida: www.p-rex.eu

- Jämföra miljöpåverkan och kostnader för de olika återvinningsteknikerna med spridning av avloppsslam och mineralgödselmedel på åkermark (inkl. produktkvalitet och dess lämplighet som gödselmedel, LCA samt LCC).
- Implementering i Europa – bl.a. marknadshinder, krav, lagstiftning och slutanvändares efterfrågan, regionala förutsättningar, vägledningsdokument etc.

Med projektet P-REX förväntar man sig också att öka allmänhetens medvetenhet om fosforfrågan samt att skapa nya marknader och broar för teknikerna i fullskala.

RecoPhos (EU-projekt, FP7)

RecoPhos² (*Recovery of Phosphorus from Sewage Sludge and Sewage Sludge Ashes with the Thermo-Reductive RecoPhos Process*) är ett forsknings- och demonstrationsprojekt som genomförs inom EU:s sjunde ramprogram. Projektet, som pågår under 36 månader (start 2012-03-01), har ett konsortium bestående av 10 partners från sex olika länder.

Projektet har som mål att utveckla en hållbar och effektiv process för utvinning av fosfor i aska från avloppsslam (RecoPhos).

RecoPhos är en termokemisk process. Fosfat och tungmetaller utvinns ur högt tempererad aska från avloppsslam. Fosfor samlas sedan i en tunn film och kan avdunsta från filmen utan att reagera med andra ämnen, och kan hämtas som vit fosfor eller oxideras till fosforsyra. Förutom fosfor, producerar RecoPhos även strömmar av sekundära råmaterial som kan användas inom andra industriella tillämpningar – t.ex. järnlegering och silikatslagg som kan användas som bindmaterial inom cementindustrin. Processen möjliggör även val av avfallsmaterial som värmekälla, reduktionsmedel eller tillsatsmaterial.

RecoPhos-processen ska utvecklas genom laboratorieförsök samt state-of-the-art modellering och simulering, vilket kommer att utgöra grunden för implementering av en fulldrifts reaktor i ”bänkskala” och design för en anläggning i pilotskala. Ekonomiska, miljömässiga och sociala effekter kommer att undersökas genom marknadsundersökning och LCA.

Slambränsleblandningar – Förbränning och fosforutvinning (Waste Refinery, 2013)

Inom Waste Refinery, ett nationellt kunskapscentrum, genomförs under 2013 ett projekt kring förbränning och fosforåtervinning ”*Slambränsleblandningar – Förbränning och fosforutvinning*” – vilket handlar om hantering av slammet och samtidig utvinning av fosfor. Projektet syftar till att visa att man kan samförbränna slam med returträflis i befintliga pannor och att man sedan genom att processa askan kan utvinna fosfor. Flygaska och bottenaska från proveldningar av slambränsleblandningar ska genomgå laboratorieförsök med fosforutvinning (genom metoden CleanMAP®) (Waste Refinery, 2013).

² Projekthemsida: www.recophos.org

Konferenser och The European Phosphorus Platform

Det pågår flera, både små och stora, aktiviteter inom området fosforåtervinning. Exempel på konferenser 2013 är:

- *2nd Scientific European Phosphorus Workshop* (Wageningen, 6-7 februari 2013)
- *European Sustainable Phosphorus Conference* (Bryssel, 6-7 mars 2013)

Vid konferensen där över 300 personer från hela Europa (företag, institut, organisationer, regeringar) deltog skapades *The European Phosphorus Platform*³ (150 organisationer har redan undertecknat). Med hjälp av plattformen hoppas man bl.a. främja, utveckla och öka fosforåtervinningen (Scoop Newsletter, 2013b).

- *Global TraPs World Conference* (Beijing, 18-20 juni 2013)

Nyhetsbrev

*The SCOPE NEWSLETTER*⁴ – är ett nyhetsbrev med aktuell information inom området fosfor som ges ut av CEEP, Centre Européen d'Etudes sur les Polyphosphates. CEEP bildades 1971 som en samarbetsorganisation av den Europeiska Fosfatindustrin.

Exempel på Fosforåtervinning i Japan

I Japan går allt avloppsslam till förbränning. Samtidigt finns intresse av metoder för fosforåtervinning. I en fallstudie har man titta på två industriella avloppsreningsverk med kalciumfosfatutfällning från processvatten (i drift sedan 1998, och 2007), samt tre kommunala avloppsreningsverk med olika metoder för fosforåtervinning:

- Kalciumfosfatutfällning från avloppsvatten (i drift sedan 2009)
- Struvitfällning ur rejektvatten från slamavvattning vid reningsverk med biologisk fosforrening. (i drift sedan 1999)
- Fosforåtervinning genom natriumhydroxidlösning vid pH 11 för att frigöra fosfor från aska, följt av fast-vätskeseparation och därefter reaktion med kalciumhydroxid för att bilda kalciumfosfater (i drift sedan 2010)

För samtliga reningsverk fanns problem med att hitta en marknad för den återvunna fosforprodukten. De avtal som har tecknats med gödseltillverkare eller grossister, som smälter fosforprodukterna till mer kompletta NPK-gödselmedel, innebär dock inte tillräckliga intäkter för att täcka driftskostnaderna. Trots låga intäkter förväntas fosforåtervinning vara ekonomiskt försvarbart utifrån andra kostnadsbesparingar som t.ex. minskad kostnad för deponering av slammet (Scoop Newsletter, 2013a). Vid avloppsreningsverk med biologisk fosforrening frigörs fosfat vid slambehandlingen som med rejektvattnet återförs till reningsverket. Struvitfällning ur rejektvattnet bidrar därmed

³<http://www.phosphorusplatform.org/esp2013.html>

⁴<http://www.ceep-phosphates.org/Newsletter/shwNewsList.asp?NID=3&HID=4>

till att minska återföringen av fosfor till reningsverket och därmed kostnaden för reningsprocessen.

Användning som gödselmedel

Fosfors växttillgänglighet

Fosfor (P) är, tillsammans med kväve (N) och kalium (K), ett makronäringsämne för växtlighet. En stor del av den fosfor som finns bunden i marken är dock inte direkt tillgänglig för växter (dvs. ej lättillgänglig), samtidigt som frigörelsen av fosfor är långsam. Växterna utnyttjar i första hand mer lättillgängligt fosfat om det finns i marken, och gödsling med lättillgängligt fosfat ger en mer omedelbar gödslings effekt. Dock kan man få problem med utläckage av fosfor. Fosfat som stannar i marken kommer dock med tiden att bindas till järn och aluminium och blir därmed mindre lättillgängligt. För att bestämma återvinningsgraden av fosfor bör man därmed bedöma hur stor del av fosfaten som kan tillgodogöras vid gödsling. Vid odling utarmas markens förråd av lättillgänglig fosfor, och det finns därför ett behov av tillförsel av lättillgänglig fosfor som framför allt handelsgödsel, stallgödsel och rötrest (biogödsel) eller slam från avloppsreningsverk. Tillförsel av fosfor kan ske genom s.k. förrådsgödsling (dvs. gödsla för flera skördars behov).

En fördel med utvunna fosforprodukter ur t.ex. avloppsslam är att de har en lägre halt av flera metaller än avloppsslam och att de knappt innehåller några miljöfarliga organiska ämnen (Tideström & Alvin, 2010). Att skapa rena fosforprodukter, genom att tillämpa olika fosforåtervinningstekniker, kan öka återvinningspotentialen för fosfor från avfall.

Vad önskar jordbruket och skogsbruket?

På kort sikt, och under torra förhållanden, är löslig fosfor att föredra för att gröda inte ska få fosforbrist. I det långa perspektivet verkar fosfors form vara mindre avgörande, och växternas försörjning av fosfor är istället mer beroende av balansen mellan jordart (fukt, luft, temperatur), gröda och gödsling (Linderholm, 2012). Detta var slutsatserna utifrån ett treårigt fältförsök av Linderholm (2012) med havre och korn som studerade fosfors växttillgänglighet utifrån gödselmedlen mineralgödsel, aska och *järnfällt-, aluminiumfällt-, kalkfäll-* och biologiskt slam. Efter ett år visade alla gödslingsförsök, utom det med mineralgödsel, fosforbrist hos grödan medan det år två och tre inte upptäcktes några signifikanta skillnader mellan de olika gödslingsförsöken.

På **jordbruksmark** är i första hand kväve tillväxtbegränsande men även den fosfor och kalium som transporteras bort från ett fält via skörd behöver ersättas via tillförsel. En återvunnen fosforprodukt (genom någon av beskrivna tekniker) behöver därför ofta kompletteras med kväve och/eller kalium.

För slutprodukten önskas också en form som lämpar sig för spridning med dagens spridningsteknik, t.ex. mineralgödselspridare vilken kräver millimeterstora granuler.

Behovet av komplettering av näringsämnen och en lämplig form på slutprodukten kan innebära att vissa återvunna slutprodukter behöver formuleras inför gödsling.

Det växtnäringsämne som är begränsande för **skogsmark** är vanligtvis kväve, undantaget är bl.a. torvmarker där fosfor istället är begränsande och det råder överskott av kväve (Sternbeck m.fl., 2013).

Gödselmedel för lantbruket

Lantbrukaren önskar gödselmedel till låga priser med hög koncentration av växtnäring för att få låga kostnader även för hanteringen. Gödselmedlet bör vidare vara homogent och stabilt beträffande fysikaliska egenskaper och innehåll av växtnäring. Gödselmedlet skall ej vara pH-sänkande. Vaxtnäringen ska vara lättillgänglig för växterna och risken för att växtnäringen ska förloras under hanteringen t.ex. som ammoniak ska vara liten. Gödseln ska kunna spridas med dagens precisionsteknik, dvs. i första hand antingen med kombisåmaskin, mineralgödselspridare eller med flytgödselspridare. Det betyder fysikaliskt att gödseln hanteras som granuler eller som pumpbar vätska (Ljung m.fl., 2013).

Koncentrationerna i ett vanligt NPK-gödselmedel för vårstråsäd är 27-3-3 + 3S, dvs. 27 % N, 3 % P, 3 % K + 3 % S, (beror på gröda) vid tillförsel på en mellanlera med P-klass III och K-klass III och innebär givor om ca 400 kg/ha, tillfört vid sådd i vissa fall kompletterat med en ytterligare giva av kväve och svavel senare under växtodlingssäsongen. För god kväveeffekt bör kvävet vara till största delen i löslig form (mer än 80 %) och nitratform (NO_3^-) är att föredra för att minimera ammoniakavgången. När det lösliga kvävet är i ammoniumform (NH_4^+), måste teknik användas som minimerar ammoniakavgången för att få god kväveeffekt (Ljung m.fl., 2013).

Gödslingsrekommendationer

Jordbruksverket ger varje år ut gödslingsrekommendationer. Rekommenderade givor baseras på markanalyser, gröda, förfrukter och för spannmål optimeras rekommenderad kvävegiva även efter förväntad avkastning, spannmålspris, appliceringsteknik och eftersträvd proteinhalt. Förutom N, P och K så ges rekommendationer för tillförsel av makronäringsämnena svavel (S) och magnesium (Mg) och mikronäringsämnena bor (B), koppar (Cu) och mangan (Mn). Grödorna har också behov av järn (Fe), zink (Zn), molybden (Mo) och kobolt (Co) men i så små mängder att de inte finns med i rekommendationerna. Vid kalkning tillförs kalcium (Ca). Vallarna har stort behov av kalium, medan det på lerjordar ofta inte finns behov av att tillföra kalium till stråsäd (Ljung m.fl., 2013).

Kadmium

Kadmium är en av de mest diskuterade föroreningarna vid slam användning. Tittar man enbart på fosforprodukternas kadmiumbidrag så är förbränning den bästa metoden för återföring (ger inget nytt kadmium till jorden). Även struvit ska ha ett lågt kadmiuminnehåll. Både mineralgödsel och slam ger ett större kadmiumbidrag till jorden än vad struvit och fosfor från aska ger (Linderholm, 2012).

I tabell 1 redovisas en jämförelse av kadmiumfosforkvoten i några olika fosforprodukter.

Tabell 1. Jämförelse av halten fosfor och kadmiumfosforkvoten i några olika produkter (Carlsson m.fl., 2013).

Produkt	Fosfor [% av TS]	Kadmiumfosforkvot [mg Cd/kg P]
Struvit	11	3
Askgranuler (Ash Dec)	4	6
Mineralgödsel		3-25
Avloppsslam svenskt (medelvärde)	2,8	33
Avloppsslam certifierat (median)	3,0	26

Metoder för fosforavskiljning och återvinning

Utgångsmaterial för återvinning av fosfor

Möjliga utgångsmaterial som innehåller fosfor från avlopp kan vara avloppsvatten, avloppsslam, aska från förbränt avloppsslam samt separerad urin och svartvatten⁵.

Avloppsslam, stallgödsel och biogödsel med flera restprodukter har låg koncentration av växtnäring jämfört med mineralgödsel. Lagring, transport och spridning på åkermark blir därför dyrare och kräver mer energi jämfört med mineralgödsel. Det finns även risk att metaller och ev. andra oönskade ämnen tillförs åkermarken i halter som långsiktigt kan skapa negativa miljökonsekvenser. Sammantaget är det därför intressant om avloppsslam, stallgödsel och biogödsel kan vara utgångsmaterial för återvinning av framför allt fosfor men även andra växtnäringsämnen.

⁵ Användning av urin och svartvatten som utgångsmaterial för återvinning av fosfor i stor skala anses inte aktuellt.

Materialen innehåller, förutom fosfor, också andra växtnäringsämnen och material som är intressant ur ett resursperspektiv, t.ex. kväve, mikronäringsämnen och mullbildade ämnen.

Stallgödsel används idag som gödselmedel inom jordbruket, och i princip allt stallgödsel återanvänds. Av den totala producerade mängden biogödsel⁶ från samrötningsanläggningar år 2011 användes 94 % som gödselmedel (Statens energimyndighet, 2012). Biogödseln har dock en låg TS-halt och skulle därför kunna gynnas av koncentrerings teknik inför användning som gödselmedel.

I moderna reningsverk avskiljs majoriteten av fosfor (enligt SCB (2012) var reningsgraden för fosfor 95 % år 2010) till slam som sen kan spridas på åkermark för återvinning av fosfor och andra växtnäringsämne. Under 2010 spreds ca. 25 % av producerad mängd avloppsslam⁷ på åkermark (SCB, 2012). Slammets genomsnittliga näringsinnehåll år 2010 var 2,8 % fosfor och 4,4 % kväve, samt att de genomsnittliga metallhalterna i slammet underskred gränsvärdena (SCB, 2012). Ett problem med spridning av slam direkt på åkermark är att reningsverk ofta använder järn eller aluminium för fosfatutfällning och den direkta växttillgängligheten här anses ofta vara låg (forskningen ger dock inget entydigt svar om växttillgängligheten på kort- respektive lång sikt).

Förutom användning av slam på åkermark förekommer även **förbränning** av slam i flera europeiska länder. Fosfor går inte förlorad under förbränningen och nästan all fosfor finns kvar i askan, däremot förloras kväve och svavel. Fosfor i askan är dock inte lättillgängligt för växterna och dessutom är många av metallerna som fanns in i slammet också koncentrerade i askan. Enligt Linderholm (2012) bidrar fosforgödselmedel framställda av aska från förbränning inte till att något nytt kadmium tillförs jorden.

Förbränning innebär att fosfor koncentreras i askor (efter förbränning av utgångsmaterialet slam). Vid återvinning av fosfor ur aska är monoförbränning⁸ av slammet att föredra. Försök med samförbränning med annat avfall som gjorts av Stockholm Vatten, följt av lakning av askan, visar att kvoten utlöst fosfor/metall blir lägre vid samförbränning (Levlin m.fl., 2000). Det finns i dagsläget ingen monoförbränning i Sverige (Carlsson m.fl., 2013), men enligt Tideström & Alvin (2010) har ett tiotal svenska avfallsförbränningsanläggningar tillstånd till slamförbränning som inte utnyttjas.

Vid återvinningstekniker som bygger på förbränning kan uppemot 100 % av fosforinnehållet i utgångsmaterialet återvinnas (t.ex. för tekniken AshDec), vilket motsvarar cirka 95 % av fosfor i inkommande vatten till avloppsreningsverket (Carlsson m.fl., 2013). Samtidigt minskar risken för smittspridning eftersom metoden innebär total avdödning av bakterier, virus och parasiter (Carlsson m.fl., 2013). Nackdelarna med förbränning och utvinning av fosfor ur askan är att det är en energi- och kemikaliekrävande process samt att

⁶ Producerad mängd biogödsel från samrötningsanläggningar år 2011 var 717 910 ton våtvikt (Statens energimyndighet, 2012).

⁷ Producerad mängd avloppsslam år 2012 uppskattas till 203 520 ton TS (SCB, 2012).

⁸ Monoförbränning: Förbränning i separata pannor som reserveras för ett visst material

det bidrar till ökade utsläpp till luft (kväveoxider) och vatten (Carlsson m.fl., 2013). Dessutom krävs investering i separat panna för monoförbränning av materialet.

Sammanställning av metoder för fosforåtervinning

Det finns metoder både för fosforavskiljning och för fosforåtervinning. Alla metoder för fosforavskiljning är dock inte lämpliga för fosforåtervinning, t.ex. utfällning av fosfor med järn eller aluminium. Järn- och aluminiumutfällning kan, t.ex., användas på reningsverk för att fälla ut vattenlöslig fosfor från vattnet och bilda järn- eller aluminiumfosfat. För att återvinna den avskilda fosfor måste detta dock brytas upp ytterligare (se vidare under fosforprodukter).

De tre utgångsmaterial som finns tillgängliga för att återvinna fosfor från avlopp är:

- 1) Avloppsvatten
- 2) Avloppsslam (rötat eller orötat)
- 3) Aska (från förbränning av avloppsslam)

Bilaga 1 redovisar en sammanställning över tekniker och slutprodukter för fosforåtervinning. För att återvinna fosfor (fosforslutprodukter) ur dessa material finns, framför allt, följande metoder tillgängliga:

- a) Kemisk fällning
- b) Kristallisation
- c) Lakning med syra eller bas
- d) Adsorption
- e) Mekanisk separering
- f) Filtrering (omvänd osmos)
- g) Termisk avdunstning/torkning

Kväveförluster förekommer, i olika omfattning, vid metoder för avskiljning och återvinning av fosfor. Det innebär att växtnärsämnet kväve går förlorat och kvävegödselmedel behövs för att ersätta den förlorade växtnäringen. Samtidigt bidrar tillverkningen av kvävegödselmedel till ökade koldioxidutsläpp (Carlsson m.fl., 2013). Kväve är ett värdefullt näringsämne, som även är energikrävande att ersätta, så tekniker som kan behålla kväve i användbarform är att föredra (Linderholm, 2012).

En sammanställning av teknologier för fosforåtervinning och rening av tungmetaller baserad på Pinnekamp m.fl. (2011) redovisas i tabell 2 (Norén m.fl., 2013). För vattenlösningar är kristallisation av fosfor som CaPO_4 eller MgNH_4PO_4 , struvit, de vanligaste metoderna för att återvinna fosfor, men adsorption på naturliga eller syntetiska material är också möjliga metoder. Vid kristallisation tillsätts mestadels magnesium och NaOH eller Ca(OH)_2 , men i vissa processer kan kalcium närvarande i lösningen användas för utfällning och endast tillsats av såddkristaller behövs. Mängden fosfor som kan utvinnas är i intervallet 30 till 80 %. För vissa återvinningsmetoder krävs att Bio-P, biologisk fosforering används, eftersom Bio-P slam släpper fosfor i anaerob miljö. Det är också möjligt att antingen behandla slam eller aska efter förbränning av slam för att få ut en återvinningsbar fosforfraktion.

Tabell 2. Sammanställning av teknologier för återvinning av fosfor och rening från tungmetaller (Norén m.fl., 2013).

	Komplexitet	Effektivitet	Lönsamhet	Produktkvalitet	Inga nya Miljöproblem	Fullskala	Erfarenhet av placering	Processflöde	Metod för fosforsepar.	Metod för tungmetallsepar.	Euro per kg fosfor
Från vattenfas											
Biotech							d	A	Ads.	SPL	
Phostrip	+	0	0	+	+	0	d	B	Crys.	SPL	
Prisa	+	0	0	+	+	0	d	B,C	Crys.	SPL	7,7 - 8,9
Crystalactor	+	0	+	+	+	+	d	B,C	Crys.	SPL	5,9 - 6,8
Pearl Ostara	+	0	+	+	+	+	d	B,C	Crys.	SPL	10
Phosnix	0	0	0	+	+	+	d	B,C	Crys.	SPL	
P-RoC	0	0	0	0	0	0	d	B,C	Crys.	SPL	3 - 12
Recyphos	0	0	0	0	0	-	d	A	Ads	SPL	
Phoseidi	0	0	0	0	0	-	d	B,C	Crys.	SPL	
Ekobalans	0	0	0	+	+	(0)					
Från slam utan lakning											
Berlin (Airprex)	0	-	0	+	+	0	d	4	Crys.	SPL	3
FIX-Phos	0	-	0	0	+	-	d	4	Crys.	SPS	2 - 7
Från slam med lakning											
Stuttgartprocessen	+	+					d	5	Crys.	A+C	
Phoxnan		+					d	4	Crys.	A+M	11 - 25
Seaborne	-	+	-	+	-	0	d	5	Crys.	A+MS	46
Loprox/Phoxnan	-	+	-	+	-	-	s	4	Crys.	A+M	
Aqua Reci	-	+	-	+	-	0	s	4	Crys.	SA, A+MF	
Krepro (Cambi)	-	+	-	+	-	0	s	5	Crys.	Ingen Info	
Från aska - våtkemi											
Sephos	-	+	0	0	-	-	c	6	Crys.	A+F	
SesalPhos							c	6	Crys.	A+F	7,5 - 9
PASCH	-	+	0	+	0	0	c	6	Crys.	H+U	4,4
Biocon	-	+	0	md	md	md	md	6	Crys.	S+IX	
Bioleaching	0	+	0	+	0	-	c	6	Crys.	BPL	
Lakning med H ₂ SO ₄ +Mesep.	0	+	+	(+)	0	(+)	c	6	Uppl	A+F	
Från aska – termisk metallurgi											
Mephrec	0	+	0	0	0	0	s	6	Aska	Sm+G	
Ash Dec	0	+	(+)	(+)	0	0	c	6	Aska	SMCI	2,2
Från delflöde (urin och fekalier)											
Fällning	+	+	0	+	0	0	d,s		Crys.		
Avdunstning	0	+	0	+	0	0	d,s		Crys.		
Kompost	+	0	0	+	+	+	d,s		Komp.		

Processflöde

- A: utgående vatten
 B: Olika delföde från Bio-P
 C: Rejektvatten slamavvattning

Placering

- d: Decentral
 s: Semicentral
 c: Central

Metod för fosforseparering

- Crys: Med crystalactor
 Ads: Adsorption

Metod för tungmetallseparering

- SPL Selektiv fosforlakning i vattenfas
 A+C Syralakning + komplexbindning av metall
 SA Selektiv syralakning av fosfat
 A+MF Syralakning + selektiv fällning av tungmetall
 A+F Syralakning + selektiv fällning av fosfor
 SMCI Selektion före förbränning
 SPS Selektiv fosforfällning i slam
 A+M Syralakning + membranseparation av fosfat
 A+MS Syralakning + metallsulfidfällning
 Sm+G Metall förångas vid 2000 °C + separeras ur rökgas
 H+U Lakning med HCl + extraktion av Me-Cl komplex
 S+IX Lakning med H₂SO₄ + selektivt jonbyte av tungmetall
 BPL Lakning av fosfor från aska med bakterier

I AirPrex Berlinmetoden strippas CO_2 efter anaerob rötning från slammet varvid pH ökar, och ingen extra bas utan enbart magnesium behövs för att bilda struvit. De bildade struvitkristallerna separeras gravimetriskt från slammet och kan efter tvättning användas som gödning. I Fix-Phos-processen, tillsätts kalciumsilikathydrat såddkristaller i den anaeroba reaktorn. Efter 10 dagar bildas $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ -kristaller som kan separeras från slammet.

I andra metoder behandlas slammet med syror för att lösa upp fosfat före kristallisation. Dessa metoder är effektivare men också dyrare på grund av större kemikaliekostnader. Ett annat alternativ är att använda bakterier för urlakning av fosfor från aska i bioläkning processen. För aska används mestadels syra för att lösa upp fosfor, men för Memphrec och Ash Dec, utvinns fosfat från slam vid förbränning.

Separation av tungmetaller

Vid separation av fosfatkristaller från utgående vatten, rejektvatten, och vatten från slamavvattning, kommer tungmetallerna att stanna i slammet. Slambehandling med syra innan kristallisation för bättre fosforåtervinning ger också upplösning av tungmetaller. Olika metoder används för att separera tungmetaller från fosfor. I Stuttgartprocessen sker metallkomplexbildning med citronsyra. Andra metoder är membran (Phoxnan), sulfidfällning (Seaborne), extraktion med lösningsmedel (Pasch), jonbyte (Bio-con).

Det är möjligt att med bas lösa upp fosfor från aska utan att lösa ut tungmetaller (Levlin, 2006, 2007). Med Aqua Reci-metoden lakas aska från superkritisk oxidation av slam med bas varefter fosfaten fällt ut. Efter upplösning med syra behövs metoder för separation av tungmetaller från upplöst fosfat.

Det är även möjligt att separera tungmetaller vid förbränning. I Ash Dec bildar metaller metallklorider genom tillsats av kloridsalter. Dessa metallklorider har lägre förångningstemperaturer än metallerna och kan efter förångning separeras från rökgaserna. I Mephrec-metoden, sker förbränningen vid så hög temperatur, $2\ 000^\circ\text{C}$, att alla tungmetaller förångas utan tillsats av klorider. I båda processerna stannar fosfor i askan.

Fosforprodukter

Utifrån de olika utgångsmaterialen (fosforkällorna) och metoderna för fosforavskiljning och -återvinning kan, bl.a., följande fosforrika produkter bildas (se också avsnittet om användning som gödselmedel):

- Fosforsyra
- Struvit
- Kalciumfosfat, apatit och hydroxylapatit
- Natriumfosfat
- Ammoniumfosfat

- Magnesiumfosfat (*uppgifter om växttillgänglighet saknas*)
- Järnfosfat
- Aluminiumfosfat
- Zeolite (*används för upptag av fosfor, uppgifter om växttillgänglighet saknas*)

Fosforsyra

Fosforsyra är en produkt som produceras av fosfatindustrin med kalciumfosfat som råvara och har därmed ett högre förädlingsvärde än kalciumfosfat (Hultman m.fl., 2002). Återvinning av fosfor som fosforsyra minskar även förbrukningen av de resurser (främst svavel i svavelsyra) som behövs för att producera fosforsyra. Kalciumfosfat är den fosforprodukt som är lämpligast för användning som råvara i fosfatindustrin och har därmed ett stort kommersiellt värde. De processer som används (Corbridge, 1995) är dels framställning av fosfor genom elektrisk ugn (10 % av produktionen) och dels framställning av fosforsyra genom lakning med svavelsyra (90 % av produktionen). Vid lakning med svavelsyra kan enbart kalciumfosfat användas och vid fosforframställning med elektrisk ugn kan både kalcium- och aluminiumfosfat användas. De kemiska reaktionerna för framställning ur kalciumfosfat är:

Lakning med svavelsyra: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{PO}_4 + 3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Elektrisk ugn: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{SiO}_2 + 5\text{C} \rightarrow 3\text{CaSiO}_3 + 5\text{CO} + \frac{1}{2}\text{P}_4$

Förekomst av järnfosfat minskar utbytet i processerna varför man vill ha en råvara som är fri från järnfosfat.

Struvit

Struvit (magnesiumammoniumfosfat $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) är en kristallin förening som är löslig vid låga pH. Struvit fälls ut i lösningar som innehåller magnesium- (Mg^{2+}), ammonium- (NH_4^+) och fosfatjoner (HPO_4^{2-}) (för spontan fällning krävs övermättnad av dessa joner). Faktorer så som mättnadsgrad av ovan nämnda joner, lösningens sammansättning, pH samt tid och temperatur påverkar struvitfällningen. Struvit fälls ut vid pH 7-11 (optimalt pH i försök ligger kring 8,5-9) (Fransson m.fl., 2010).

Struvit är ett gödselmedel som löses upp långsamt. Enligt Fransson m.fl. (2010) har tidigare studier visat på att tungmetallinnehållet i produkten är mycket lågt (von Münch & Barr, 2001) och att läkemedelssubstanser, som blandats i urin, återfanns med ca. 95-100 % i lösning efter fällning (Ronteltap m.fl., 2007). Enligt Linderholm (2012) har struvit ett lågt innehåll av kadmium.

För **struvitfällning/kristallisation** av fosfor bör reningsverket ha biologisk fosforavskiljning (bio-P), eftersom fosforhalten i delströmmen annars blir för låg. I Sverige finns i dagsläget enbart ett 20-tal reningsverk med biologisk fosforreduktion, vilket gör

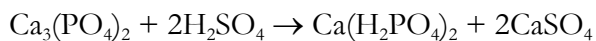
tekniken begränsad vid dagens reningsteknik (metoden fungerar även för småskalig återvinning av fosfor i urin). Ca. 20-35 % av fosfor i inkommande vatten förväntas kunna återvinnas med hjälp av fällning/kristallisation (Carlsson m.fl., 2013).

Den skapade slutprodukten innehåller både fosfor och kväve (om än bara en liten del) – t.ex. innehåller torra struvitkristaller 13 % fosfor och 6 % kväve. Däremot förloras mullbildande materialet. Metoden bidrar inte till ökade utsläpp till luft och vatten (Carlsson m.fl., 2013).

Det finns många tekniker med struvitfällning, varför intresset för struvitfällning och optimering av processen ökar. Det finns i dagsläget ett antal struvitprodukter på marknaden som säljs under olika varunamn, t.ex. det kanadensiska företaget Ostaras struvitprodukt *Crystal Green*®. Marknaden är dock på flera håll tveksam till struvit.

Kalciumfosfat (apatit och hydroxylapatit)

Apatit är kalciumfosfatmineral som kan innehålla [kalciumfluorid](#) ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) eller [kalciumklorid](#) ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) eller. Benvävnad består av hydroxylapatit, som är en form av apatit som innehåller kalciumhydroxid ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). I början av 1800-talet var benmjöl och guano de mest sålda gödselmedlen (Mårald, 2000). För att göra kalciumfosfaten mer växttillgänglig började man i mitten av 1800-talet producera superfosfat, där apatiten behandlas med svavelsyra och omvandlas till blandning av gips och kalciumdivätefosfat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$). Både benmjöl och apatitmineral kan användas som råvara vid tillverkning av superfosfat (Oden, 1927).



Både struvit och kalciumfosfat är generellt relativt lättvittrade produkter (Carlsson m.fl., 2013) och därmed är de mer växttillgängliga än svårvittrade produkter. Enligt Carlsson m.fl. (2013) är dock växttillgängligheten hos struvit och kalciumfosfat tillräckligt stor för att fungera som förrådsgödselmedel. Även ammoniumfosfat, som är en mer lättillgänglig typ av fosfor (där fosfor snabbt binds in), fungerar som förrådsgödselmedel. Frigörelsen av fosfor från struvit, kalciumfosfat och hydroxylapatit är dock för långsam för att häva akut fosforbrist (Carlsson m.fl., 2013). Enligt Carlsson m.fl. (2013) är hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) en relativt svårvittrad produkt med låg växttillgänglighet. Den bedöms därför inte vara lämplig som gödselmedel inom jordbruket. Däremot skulle produkten ev. kunna användas som gödselmedel inom skogsbruket där det är viktigt med långtidsverkande gödselmedel. Benmjöl, hydroxylapatit, finns dock att köpa i trädgårdsaffärer för gödsling av rabatter.

Kalciumfosfat är, enligt Cohen (2005), en svårslöslig produkt varför en direkt tillförsel till marken skulle innebära en ineffektiv användning av fosforprodukten. Istället kan kalciumfosfat användas som ersättning för råfosfat i industrin. Struvit kan däremot inte användas inom industrin pga. sitt magnesiuminnehåll, och måste istället användas som gödselmedel. Struvitkristallerna är dock svåra att hantera och sprida, och måste därför

granuleras innan spridning (Cohen, 2005). Enligt Fransson m.fl. (2010) föreslås dock användning av struvit även som råvara till fosfatindustrin.

Försök och tester av gödningsmedel av typerna *kalciumfosfat*, *magnesiumfosfat*, *aluminiumfosfat* samt *struvit* (genomförda av Waida & Gäth (2011) samt Weinfurtner (2011)) visar, enligt Carlsson m.fl. (2013), bl.a. på följande:

- fosforhalten var högst hos *termokemiskt framställd kaliumfosfat* och *struvit* (Waida & Gäth, 2011)
- fosforlösligheten var högst hos vissa *våtkemiskt framställda kaliumfosfater* och *struvit* samtidigt som den var låg hos *termokemiskt framställd kaliumfosfat* (Waida & Gäth, 2011).

Natriumfosfat

Natriumfosfat har vid gödsling ett lika stort värde som apatit (Toole m.fl., 1991) och bedöms därmed ha en god växttillgänglighet.

Ammoniumfosfat

Ammoniumfosfat är en lättillgängligt av fosfor som kan användas vid akut fosforbrist (lättlöslig 580 g/l) hos en gröda. Ammoniumfosfat kan även användas som förrådsgödselmedel (Carlsson m.fl., 2013). För att kunna sprida ammoniumfosfat med spridare behöver det formuleras, men eftersom ammoniumfosfat är lättlösligt kan det även användas för utblandning i bl.a. flytgödsel (Carlsson m.fl., 2103).

Järn- och aluminiumfosfat

Järn- eller aluminiumfosfat som uppstår vid fällning av fosfor i reningsverk är en svårlöslig produkt (begränsad fosforverkan) (Cohen, 2005).

Järnfosfat betraktas av fosfatindustrin som en förorening som nedsätter utbytet i processen och som enbart har ett värde om den kan användas för direkt gödsling (Hultman m.fl., 2002). Då fosfor är starkare bundet i järnfosfat än i andra fosforprodukter är fosfor i järnfosfat mindre växttillgänglig varför en fosforprodukt som järnfosfat därmed bedöms ha det lägsta produktvärdet. Emellertid då järnfosfat är mer svårlösligt medför det ett mindre utläckage av näringsämnen i samband med gödsling. Järnfosfat kan vara att föredra vid skogsgödsling, där man gödslar någon eller några gånger under en växtcykel, som sträcker sig upp mot 80 år. Skogsmark som är i behov av gödsling är främst näringsfattig torvmark. Arealen utdikad torvmark lämplig för skogsbruk, och där fosfor behövs, är ca en miljon hektar eller 4 % av den produktiva skogsmarken (Skogsstyrelsen, 2000).

Vid studier av fosfors växttillgänglighet, utifrån gödselmedlen mineralgödsel, aska och *järnfällt-*, *aluminiumfällt-*, kalkfäll- och biologiskt slam, visade alla gödslingsförsök, utom det med mineralgödsel, fosforbrist hos grödan efter ett år medan det är två och tre inte

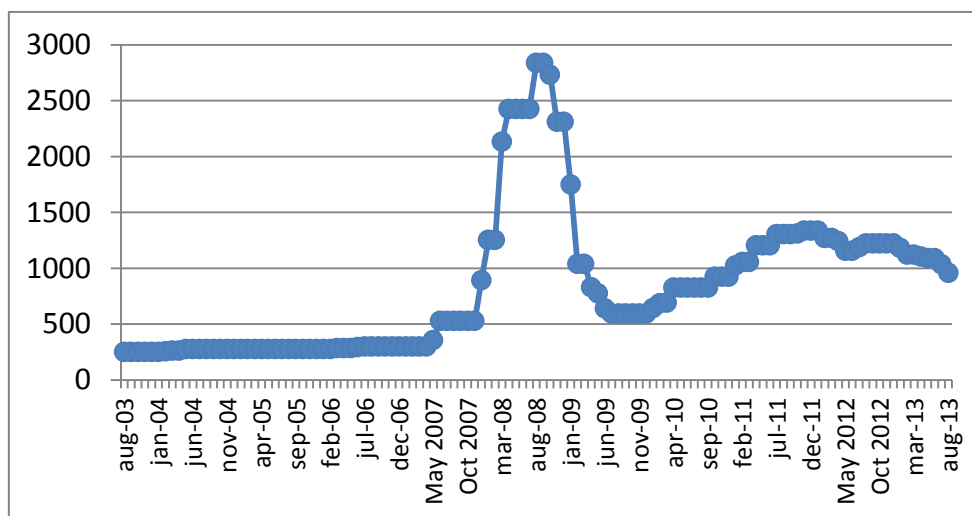
upptäcktes några signifikanta skillnader mellan de olika gödslingsförsöken (Linderholm, 2012).

Bedömning av kostnad för fosforåtervinning

Kostnad för fosfor ur fosfatmineral

Priset för fosfatmineral varierar starkt beroende på tillgång och efterfrågan, kvalitet m.m. och av procent P_2O_5 . De senaste tio åren har priset varierat mellan 12 och 42 SEK/kg fosfor (Carlsson m.fl., 2013). Figur 1 visar pris för fosfatmineral från Marocko som innehåller ca 32 % P_2O_5 . Priset var 1000 kr/ton i augusti 2013, vilket blir 7 kr/kg P^9 . Vid kostnadsjämförelser bör dessutom beaktas att

- Många gödningsmedel innehåller även kväve och kalium, vilket ger det svårt att ge ett pris på bara fosfor
- Frakten kan utgöra en stor kostnad
- Produktionskostnad och pris för konsument är mycket olika



Figur 1. Pris för fosfatmineral från Marocko (70 % BPL = 32 % P_2O_5) i kr ton¹⁰.

Fosfat kan utvinnas genom lakning med syra och bas. Kostnaderna för saltsyra är cirka 3 öre/mol och för natriumhydroxid cirka 10 öre/mol (Levlin m.fl. 2005) då HCl levereras som 34 % eller 36 % lösning i tankbil och NaOH som 50% lösning¹¹. Priset varierar

⁹ $1000 \text{ kr/ton} \times 0,32 (2 \times 31 \text{ g/mol} / (2 \times 31 + 5 \times 16) \text{ g/mol}) / 1000 = 7,1 \text{ kr/kg P}$

¹⁰ <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate>

¹¹ Pris per mol HCl = $850 \text{ kr/ton} \times 36,5 \text{ g/mol} / 1000000 = 0,03 = 3 \text{ öre/mol}$
 Pris per mol NaOH = $2500 \text{ kr/ton} \times 40 \text{ g/mol} / 1000000 = 0,10 = 10 \text{ öre/mol}$
 (pris enligt uppgift från Akzo Nobel Base Chemicals AB):

mycket med hur stora kvantiteter som beställs. Kostnaden för bas är högre än för syra, vilket gör lakning med bas är dyrare än lakning med syra. Fosforsyra tillverkas genom att laka fosfatmineral med svavelsyra. Förutom kostnaden för produktionsutrustning tillkommer kostnad för svavelsyran. Behovet är 1,5 mol svavelsyra per mol fosfat. Svavelsyra kan inköpas som 98 % lösning till samma kostnad som 33 % saltsyra¹². Svavelsyra har dock en högre molvikt vilket ger en kostnad även för svavelsyra på cirka 3 öre/mol. En förbrukning på 1,5 mol svavelsyra per mol fosfat ger en kostnad på 1,5 kr/kg P.

Kostnad för olika kommersiella processer

Kostnaden för ett antal kommersiella metoder som används för fosforåtervinning redovisas i tabell 3. Skillnaden i är betydlig med Seaborn som den dyraste tekniken med 46 Euro (400 kr)/kg P och Ash Dec som den billigaste 2,2 Euro (19 kr)/kg P. Seaborn är en flerstegsprocess med flera kemiska processteg där fosfor och tungmetaller lakas ut för att sedan separeras från varandra, varpå slutligen fosfor faller ut som struvit. En ren fosforprodukt utan tungmetaller erhålls, men de många processtegen och den kemikalieförbrukning som behövs medför att det blir en dyr process. Ash Dec innebär att man separerar tungmetaller vid slamförbränning och fosfor stannar kvar i askan. Den mängd kemikalier som behövs motsvarar tungmetallinnehållet i slammet, vilket är litet i förhållande till mängden fosfor. Dock, vid slamförbränning krävs stora anläggningar för att hålla ner kostnaden för bl.a. den rökgasrening som behövs. Vid fosforåtervinning genom direkt upparbetning av avloppsslamaska med tungmetallavskiljning bedöms kostnaden vara 1 Euro (8,7 kr)/kg P (Norén m.fl., 2013, Pinnekamp m.fl., 2011). Dock tillkommer kostnad för att fosfor i löst form behöver fällas.

Tabell 3. Kostnad för kommersiellt använda fosforåtervinningstekniker (Norén m.fl., 2013). (Antagen växelkurs 1EUR= 8,7 SEK)

Metod	Euro/kg P	kr/kg P	Referens
Pasch	4,40	38	Pinnekamp m.fl. (2011)
Crystalactor	5,9-6,8	44-59	Nieminen (2010)
Phosnix	7,7-9	97-78	Pinnekamp m.fl. (2011)
P-Roc	3,0-12	26-104	Pinnekamp m.fl. (2011)
Fix-Phos	2,0 -7	17-61	Pinnekamp m.fl. (2011)
Phoxnan	11-25,0	96-218	Pinnekamp et al (2011)
SesalPhos	7,5-9	65-78	Pinnekamp m.fl. (2011)
Ostara	10	87	Nieminen (2010)
Berlin /Airprex	3	26	Nieminen (2010)/Carlson m.fl. (2013)
Seaborne	46	400	Nieminen (2010)
Ash Dec	2,20	19	Pinnekamp m.fl. (2011)

¹² <http://www.alibaba.com/trade/>

Utvärdering av kostnad för lakning med syra och bas

Vid lakning med syra eller bas erhålls fosfor som fosforsyra, vilket är den fosforprodukt som har högst värde. De flesta fosfater är lösliga i syra, medan vissa kalciumfosfatföreningar är olösliga i baser (Stumm och Morgan, 1981), vilket minskar graden av fosforåtervinning vid lakning med bas. Lakning med syra kan lösa ut all fosfor, men löser även ut metaller vilket medför att utlöst metall måste separeras från utlöst fosfor. Utifrån antagandet att metaller löstes ut i samma grad som fosfat kan den kemiska förbrukningen i ekvivalenter per ton DS beräknas vara $5000 + 6000 \cdot \text{molförhållande järn till fosfor}$, vilket beror av mängden kemikalier som används för fosfor utfällning (Levlin m.fl. 2002). Emellertid har utförda lakningsförsök visat att järn och aluminium löses till en lägre grad än fosfat (Levlin, 2006, 2007).

Experiment med lakning oorganiska slamrester med syra och bas (Levlin, 2006, 2007) visade att med syra lakades nästan all fosfor ut medan andelen urlakade metaller var lägre. Lakning med bas gav en lägre utlakning av fosfor och enbart utlakning av aluminium. De upplösta metallerna samt anjoner från syran måste dock separeras från fosforsyran i ett andra processteg.

Tabell 4 visar kemikaliebehovet för lakning av oorganiska slamkomponenter med HCl eller NaOH (Levlin, 2006, 2007). Lakning med syra löser tre ekvivalent metalljoner per mol fosfat och kräver tre ekvivalenter syra oberoende av den metall fosfatet är bunden till. Detta innebär att syraförbrukningen måste beräknas på den upplösta mängden metalljoner. Om ekvivalenten metalljoner per mol utlöst fosfat är strax över tre, visar det att främst metallfosfater har lösts upp och att andra metallföreningar är olösta. Urlakning med bas kräver tre ekvivalent bas per mol fosfat och en ytterligare ekvivalent bas per mol upplöst aluminatjon.

Tabell 4. Kemikaliebehov för lakning oorganiska slamkomponenter med HCl eller NaOH (Levlin, 2006, 2007).

Component	Lakingsreaktion	HCl eller NaOH:	mol	gram
		Komponent:	Mol	gram
Lakning med syra				
Fe(OH) ₂	$\text{Fe(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$		2	0,812
Fe ₃ (PO ₄) ₂	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 + 6\text{H}^+ \rightarrow 3\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_3\text{PO}_4^0$		6	0,612
Fe(OH) ₃	$\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$		3	1,024
FePO ₄	$\text{FePO}_4 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_3\text{PO}_4^0$		3	0,725
Al(OH) ₃	$\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$		3	1,402
AlPO ₄	$\text{AlPO}_4 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{H}_3\text{PO}_4^0$		3	0,897
CaCO ₃	$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$		2	0,729
MgCO ₃	$\text{MgCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$		2	0,865
Lakning med bas				
FePO ₄	$\text{FePO}_4 + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{PO}_4^{3-} + \text{Fe(OH)}_3$		3	0,796
Al(OH) ₃	$\text{Al(OH)}_3 + \text{OH}^- \rightarrow \text{Al(OH)}_4^-$		1	0,513
AlPO ₄	$\text{AlPO}_4 + 4\text{OH}^- \rightarrow \text{Al(OH)}_4^- + \text{PO}_4^{3-}$		4	1,312

Lakning med syra

Om all kalcium, fosfat och aluminium löses ut kan kostnaden för syra för lakning med HCl beräknas som:

$$\text{kr/kg P} = \frac{\% \text{CaO} \times 0,0111 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 \times 0,0182 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0,0116}{\% \text{P}_2\text{O}_5 \times 0,00436}^{13}$$

Detta ger med de slamprodukter som användes vid lakningsförsöken (Levlin, 2006, 2007) 12 respektive 13 kr/kg P. Emellertid, eftersom graden av upplösta metaller är lägre än graden av löst fosfat skall procentandelen av komponenterna multipliceras med den procentuella andelen av urlakade komponent. Detta kommer att minska kostnaderna för lakning med syra.

$$\text{kr/kg P} = \frac{\text{mol HCl eller ekvivalent upplöst metall}}{\text{mol fosfat}} \times \frac{0,03 \times 1000}{31}$$

Om enbart metallfosfater löses vilket motsvarar 3 mol HCl eller 3 ekvivalenter metall per mol fosfat ut blir kostnaden 3 kr/kg P. Resultaten av lakningsförsöken visade att utlösningen av metalljoner var 3,49 ekvivalenter metall per mol fosfat, vilket ger en kostnad på 3,5 kr/kg P. Den upplösta mängden av metall visar att huvudsakligen metallfosfater har upplösts och att andra metallföreningar än fosfat har förblivit olösta.

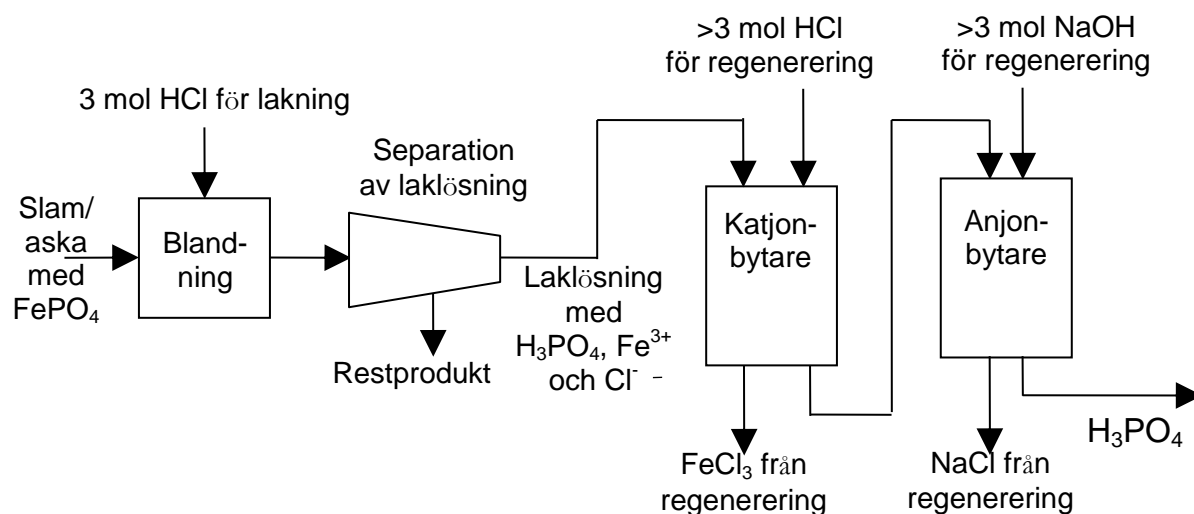
Dock enbart utlakning med syra ger en lösning med fosfat, utlösta metalljoner och motjoner från syran, från vilken fosfor skall separeras. Om denna separation sker med jonbytare (figur 2) tillkommer behov av syra för regenerering av katjonbytaren som behövs för att ta bort metalljoner och behov av bas för regenerering av anjonbytaren som behövs för att ta bort motjoner från syran. Minimumbehov av kemikalier per mol fosfat är 6 mol HCl (3 öre/mol) och 3 mol NaOH (10 öre/mol), vilket ger kostnaden:

$$(6 \times 0,03 + 3 \times 0,1) \times 1000/31 = 15,5 \text{ kr/kg P.}$$

¹³ Pris per % CaO = $2 \times (1000/56,08 \text{ g/mol}) \times 0,03 \text{ kr*/mol}/100 = 0,0111$
 Pris per % Al₂O₃ = $6 \times (1000/101,96 \text{ g/mol}) \times 0,03 \text{ kr*/mol}/100 = 0,0182$
 Pris per % Fe₂O₃ = $6 \times (1000/159,69 \text{ g/mol}) \times 0,03 \text{ kr*/mol}/100 = 0,0116$

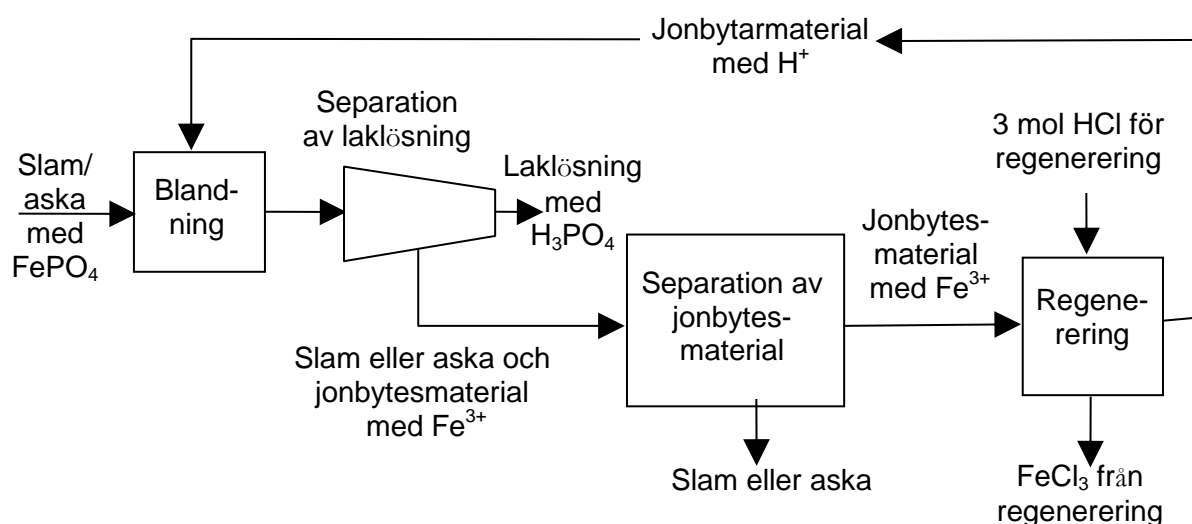
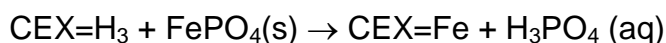
*Pris för HCl som behövs för lakning, se fotnot 11 sid 16.

¹⁴ kg P per % P₂O₅ = $2 \times 31 \text{ g/mol}/(2 \times 31 + 5 \times 16) \text{ g/mol}/100 = 0,00436$



Figur 2. Lakning med syra följt av separation med jonbytare (Levlin, 2011).

En alternativ metod kan vara att blanda slammet med kulor av katjonbytarmaterialet (figur 3). Jonbytarmaterialet avger vätejoner och tar upp metalljoner och endast fosfat kommer att upplösas. Jonbytarmaterialet regenereras med syra och den minsta mängd kemikalier blir tre mol syra per mol fosfat. Vid kombinerad lakning och separation av metaller med kulor av katjonbytarmaterial blir minimum kemikaliebehov 3 mol HCl per mol FePO₄. Kostnad: 2,9 kr/kg P.



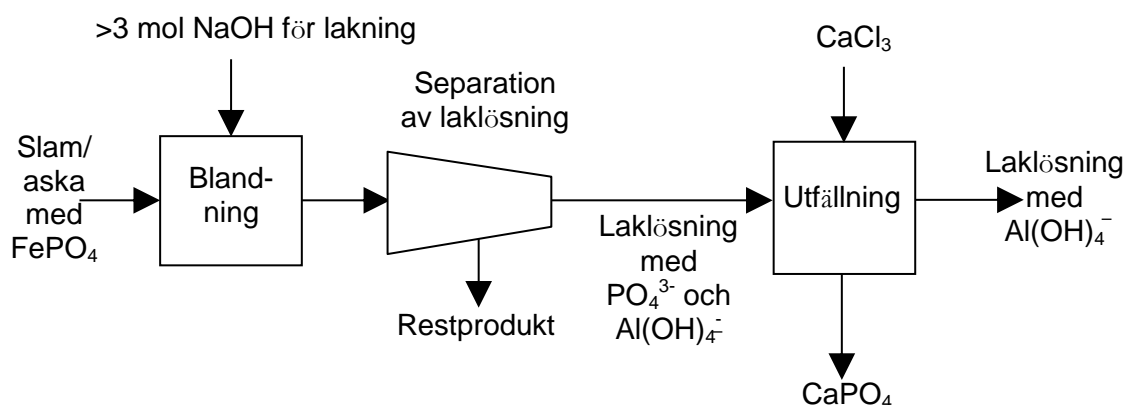
Figur 3. Lakning med kulor av jonbytarmaterial (Levlin, 2011).

Lakning med bas

Även kostnaden för lakning med bas kan beräknas på samma sätt:

$$\text{kr/kg P} = \frac{\%P_2O_5 \times 0,042 + \%Al_2O_3 \times 0,020^{15}}{\%P_2O_5 \times 0,00436}$$

Vid basisk lakning löses förutom fosfat även aluminium ut som aluminat $Al(OH)_4^-$. Minimumbehov av NaOH vid är 3 mol per mol fosfat vilket ger en kostnad av 9,7 kr/kg P plus 1 mol per mol aluminium. Utlöst fosfat kan separeras genom utfällning som kalciumfosfat (figur 4), varvid kostnad för kalciumklorid tillkommer. Då det fosfat som är bundet till kalcium inte löses i syra blir utbytet vid lakning med bas lägre än vid lakning med syra (Stark, 2005, Levlin, 2006, 2007). Ett alternativ är att använda en tvåstegsprocess och först lösa ut kalcium vid pH 3 varefter fosfaten löses upp med en bas (Levlin, 2007).



Figur 4. Lakning med bas följt med fällning av fosfat som kalciumfosfat.

Vid IVL Svenska Miljöinstitutet studeras en process där fosfat lakas ut vid hög temperatur med koncentrerad lut, varefter laklösningen kyls ner och fosfaten fälls ut som kristallin natriumfosfat Na_3PO_4 . Luten värms upp och återanvändes för ytterliggare lakning. Återanvändningen begränsas dock av att aluminiumhalten i lösningen ökar med tiden. Kostnaden bedöms till 10 kr/kg P, men kan bli högre beroende på aluminiumhalten.

¹⁵ Pris per % $P_2O_5 = 6 \times (1000/141,9 \text{ g/mol}) \times 0,10 \text{ kr*/mol}/100 = 0,042$
 Pris per % $Al_2O_3 = 2 \times (1000/101,96 \text{ g/mol}) \times 0,10 \text{ kr*/mol}/100 = 0,020$
 *Pris för NaOH se fotnot 11 sid 16.

Diskussion

Återföring av fosfor till kretsloppet är en angelägen uppgift, inte minst då fosfor är en ändlig resurs. För återvinningen är användbarheten för den återvunna fosforprodukten, samt i vilken grad fosforprodukten kan renas från tungmetaller. Värdet av fosforprodukten bestäms dels av användbarheten för gödsling eller om den kan användas som råvara av fosfatindustrin. Det högsta värdet är om den är en fosforprodukt som tillverkas av fosfatindustrin och därmed har ett högt förädlingsvärde. Att återvinna fosfor som en fosfatprodukt som varken kan användas för gödsling eller har ett värde för fosfatindustrin bidrar inte till att bevara den ändliga resursen av brytvärd fosfatmineral. Värdet för fosfatprodukt kan rangordnas:

1. Fosforsyra, produceras av fosfatindustrin och har ett högt förädlingsvärde.
2. Kalciumfosfat, apatit och hydroxylapatit, råvara för fosfatindustrin. Kan används som gödsel, speciellt om den med svavelsyra omvandlas till superfosfat.
3. Struvit, kan används som gödsel
4. Natriumfosfat, kan används som gödsel
5. Ammoniumfosfat, kan används som gödsel
6. Aluminiumfosfat, kan används som råvara i vissa processer för fosfatindustrin
7. Magnesiumfosfat
8. Järnfosfat, har osäkert gödselvärde och är oönskad av fosfatindustrin

En mängd tekniker för fosforåtervinning är föreslagna och finns i allt från idéstadium till prototyp och drift i full skala. Kostnaderna varierar men är ofta höga relativt jungfrulig fosfor. Förutsättningar är också olika som t.ex. skala för rimlig ekonomisk drift. Vissa processer är komplicerade och kräver många processteg vilket gör att kostnaden för återvinningen blir hög. I storskaliga anläggningar med slamförbränning synes rening av askan från tungmetaller och användning av askan som gödning vara en ekonomisk teknik. Till detta bör också kopplas att olika produkter framställs (se ovan för rangordning av olika fosforprodukter)

Vid bedömning av tekniker för återvinning av fosfor från kommunal vattenrening bör ett flertal faktorer tas hänsyn till. Kostnaden för uppärbetning bör t.ex. vägas mot kostnaden för omhändertagande av t.ex. slam. Viktigt är också vilka krav på renhet, t.ex. halt av tungmetaller som kadmium, som ställs. Vissa tekniker kan eventuellt också ge återföring av fler värdefulla ämnen än fosfor till marken. Det är därför viktigt att belysa de alternativa behandlingsmetoderna ur ett systemperspektiv och utifrån det perspektivet vidare utveckla metoderna för att möjliggöra ett mer slutet fosforkretslopp. Vid en möjlig större fosforbrist framöver kan också priset för jungfrulig fosfor öka och därmed göra återvinningsmetoder mer fördelaktiga.

Referenser

- Butcher, S.S., Charlsson, R.J. Orleans, G.H., Wolfe, G.V. (1992) Global biogeochemical cycles. Academic Press, ISBN 0-12-147685-5
- Carlsson, H., Hagerberg, D., Robinson, T., Tideström, H. (2013) Behandlingsmetoder för hållbar återvinning av fosfor ur avlopp och avfall. Slutrapport 2013-02-15. Tyréns AB.
- Cohen, Y. (2005) Olika sätt att utvinna fosfor ur avloppsvatten. Skift som ingår i "Nya metoder för återcirkulation av växtnäringsämnen från avfall" utgiven av SLU. Institutionen för markvetenskap, avd. för växtnäringslära. VäxtEko.
- Corbridge D.E.C. (1995) Studies in Inorganic Chemistry 20, Phosphorus, An Outline of its Chemistry, Biochemistry and Uses, 5:e utgåvan, Elsevier Science, ISBN 0-444-89307-5.
- Ek, M., Junestedt, C.: (2005) Återvinning av P samt andra ämnen ur olika askor efter upplösning. Seminar on New methods for recirculation of nutrients from waste, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Fransson, L., Löwgren, S., Thelin, G., Ekobalans Fenix AB (2010) Återvinning av näringsämnen från rörestret genom struvitfällning. Rapport SGC 218. Svenskt Gastekniskt Center.
- Hultman B., Levlin E., Löwén M., Mossakowska A., Stark K. (2002) Utvinning av fosfor och andra produkter ur slam och aska, Slutrapport. Stockholm Vatten AB, R nr 02, <http://www2.lwr.kth.se/Forskningsprojekt/Preccovery/svrapppdf>
- Levlin E. (2011) Maximizing biogas production and phosphorus recovery by ion exchange, Cities of the Future Stockholm 22-25 maj 2011. http://www2.lwr.kth.se/personal/personer/levlin_erik/CitiesFuture2011.htm
- Levlin E. (2007) Phosphorus recovery with acid and base from inorganic sewage sludge residues. Water Practice & Technology Vol. 2, No 1, doi10.2166/wpt.2007.0018
- Levlin E. (2006) Phosphorus recovery with acid and base from inorganic sewage sludge residues. IWA Specialized Conference - Sustainable sludge management. 29-31 Maj 2006 Moskva Ryssland, Proceedings, ISBN-5-9900677-2-0, sid 612-619
- Levlin E., Hultman B., Löwén M. (2005) Tvåstegslakning med syra och bas för fosforutvinning ur slam efter superkritisk vattenoxidation eller förbränning VA-forsk 2005-12,
- Levlin E., Löwén M., Stark K., Hultman B. (2002). Effects of phosphorus recovery requirements on Swedish sludge management. 2nd World Water Congress of IWA, October 15-18, Berlin, Germany, 2001 and Wat. Sci. Tech. 46(4-5) 435-440
- Levlin, E., Löwén, M., Schmidt, E., Hultman, B., Mossakowska, A. (2000) Phosphorus recovery from sewage sludge incineration ash. 1st World Water Congress of IWA, Paris, 3 - 6 juli 2000, CD-ROM, ISBN 2-9515416-0-0 EAN: 9782951541603
- Linderholm, K. (2012) Phosphorous. Flows to Swedish Food Chain, Fertilizer Value, Effect on Mycorrhiza and Environmental Impact of Reuse. Doctoral thesis no .

- 2012:84. Faculty of landscape planning, horticulture and agricultural science. Swedish University of Agricultural Science, Alnarp.
- Ljung, E., Palm, O., Rodhe, L. (2013) Ökad acceptans för biogödsel inom lantbruket. Rapport 47, Kretslopp & Avfall. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.
- Mårald, E. (2000) Jordens kretslopp: Lantbruket, staden och den kemiska vetenskapen 1840—1910 Idéhistoriska skrifter nr 33, Inst. för historiska studier Umeå universitet
- Naturvårdsverket (2013) Hållbar återföring av fosfor – Naturvårdsverkets redovisning av ett uppdrag från regeringen Naturvårdsverket Rapport 6580 ISBN 978-91-620-6580-5 Hämtad från: <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6580-5.pdf>
- Nieminen, J. (2010) Phosphorus Recovery and Recycling from Municipal Wastewater Sludge. Masters thesis, Aalto: Aalto University. <http://civil.aalto.fi/fi/tutkimus/vesi/opinnaytteet/nieminen2010.pdf>.
- Norén, F., Tjus, K., Fortkamp, U. (2013) Full-scale site solution of phosphorous retrieval from biowaste - make way for recycling of cadmium contaminated biowaste as phosphorous fertilization IVL Rapport U4184
- Oden, S. (1927) Oscar Fredrik Carlson Svenskt biografiskt lexikon Band 07, sida 500 Hämtad från: <http://sok.riksarkivet.se/sbl/artikel/16434>,
- Pinnekamp, J., Everding, W., Gethke, K., Montag, D., Weinfurtner, K., Sartorius, C., Von Horn, J. (2011). Phosphorrecycling – Ökologische Und Wirtschaftliche Bewertung Verschiedener Verfahren Und Entwicklung Eines Strategischen Verwertungskonzepts Für Deutschland (PhoBe). Gewässerschutz, Wasser, Abwasser. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Hämtad från: http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=67&cid=73&lang=de
- Ronteltap, M., Maurer, M., Gujer, W. (2007). The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. Water Research , 41, ss. 1859-1868
- SCB (2012) Utsläpp till vatten och slamproduktion 2012. Kommunala reningsverk, skogsindustri samt övrig industri. Sveriges officiella statistik, statistiska meddelanden, MI 22 SM 1201. Serie MI – Miljövärd.
- Scope Newsletter (2013a) Number 91, February 2013. Hämtad från: <http://www.ceep-phosphates.org/Files/Newsletter/ScopeNewsletter91.pdf>
- Scope Newsletter (2013b) Number 92, March 2013. Hämtad från: <http://www.ceep-phosphates.org/Files/Newsletter/ScopeNewsletter92%20ESPC%203-2013.pdf>
- Skogsstyrelsen (2000) Skogsstatistisk årsbok 2000. <http://www.skogsstyrelsen.se/Myndigheten/Statistik/Skogsstatistisk-Arsbok/Skogsstatistiska-arsbocker/>
- Stark, K. (2005): Phosphorus release and recovery from treated sludge. TRITA-LWR PHD 1024. Doktorsavhandling i Mark och Vattenteknik, KTH, Stockholm.

- Statens energimyndighet (2012). Produktion och användning av biogas år 2011. ES 2012:08. Statens energimyndighet & Energigas Sverige.
- Sternbeck, J., Österås, A.H., Allmyr, M. (2013) Riskbedömning av fosforrika fraktioner vid återförsel till åker- och skogsmark samt vid anläggande av etableringsskikt. 2013-02-15. WSP Environmental.
- Stumm W., Morgan J.J. (1981) Aquatic Chemistry, 2nd Ed, John Wiley & Sons Inc. ISBN 0 471 09173-1.
- Tideström, H., Alvin, L. (2010) Fosforutvinning ur avloppsslam – finns tekniken idag? PM. Sweco Environment
- Toole P.O., Cahalane, D.G., Farrell, E.P. (1991) Effects of phosphate fertilizer on biomass production and $N_2(C_2H_2)$ fixation by pot-grown *Ulex gallii* Planchon in a forest soil. Biology and Fertility of Soils, 12, sid 177-181.
- USGS (2013) Mineral Commodity Summaries, January 2013. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. USGS (United States Geological Survey) Hämtad från: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>
- Waida C & Gäth S (2011) Bewertung verschiedener Behandlungsverfahren von Abwasser und Klärschlamm zur Herstellung von phosphorhaltigen Sekundärrohstoff-Düngern. Gewässer-schutz-Wasser Abwasser, Aachen 2011. ISBN 978-3-938996-34-8.
- Waste Refinery (2013) *Slambränsleblandningar – Förbränning och fosforutvinning* Hämtad från: <http://www.bwz.se/sp/b.aspx?vi=12&vid=669&ucrc=5307A5D6>
- Weinfurtner K, (2011) Bewertung von Sekundärphosphaten aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche hinsichtlich Wirkung auf Bodenparameter und technische Produktqualität. Gewässerschutz-Wasser Abwasser, Aachen 2011. ISBN 978-3-938996-34-8.
- von Münch, E., & Barr, K. (2001). Controlling struvitecrystallisation for removing phosphorous from anaerobic digester sidestreams. Water Research, 35, sid. 151-159
- Zapata, F., Roy, R.N. (2004) Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture Fertilizer And Plant Nutrition Bulletin 13 FAO ISBN 92-5-105030-9 Hämtad från: <http://www.fao.org/docrep/007/y5053e/y5053e00.htm#Contents>

Bilaga 1 Sammanställning över tekniker och slutprodukter för fosforåtervinning

Teknik (Leverantör)	Princip	Slutprodukt – typ ”Namn”	Slutprodukt – information	Ev. biprodukt	Övrigt	Referens
Agua Reci (Chematur Engineering AB/Feralco AB)	Alkalisk lakning	Kalciumfosfat	Bygger på s.k. superkritisk vattenoxidation (SCWO). Slammet värms till hög temperatur och utsätts för högt tryck. Syrgas tillsätts och allt organiskt material oxideras. Reaktionen ger värme som värmer inkommande slam och även kan bli fjärrvärme. Fosfor lakas ur restprodukten med NaOH och fälls ut med kalk.	Ger värme som t.ex. kan bli fjärrvärme	Anläggningen är liten och kompakt. År 2002 hade tekniken ännu inte körts kontinuerligt under en lägre period, mer testning krävs ¹ . Pilotskala i Karlskoga, Sverige ² .	¹ (Ny Teknik, 2002) ² (Nieminen, 2010)
Ash Dec	Termisk behandling	Fosforhaltiga pellets ”PhosKraft®”	Aska från slamförbränning renas genom att tungmetaller förångas vid 1000 °C.. Pellets, 2-5 mm. > 10 % P ₂ O ₅ (dvs. > 4,4 % fosfor). All P kvar i askan, metallinnehållet minskar (avskiljning: 99 % Cd, Hg, Pb; 90 % Cu, Zn; 50 % Sn, Mb; obetydlig grad Ni, Cr, As). Granuler av en storlek som lämpar sig för spridning med gödselspridare. Återföringspotential nära 100 % av inkommande fosfor till avloppsreningsverket.	Tungmetallhaltigt avfall (farligt avfall) som innehåller de metaller som avskiljs i processen. Avfall från delar av rökgasreningen.	Pilotanläggning (kapacitet 7-10 ton aska/dygn) uppfördes 2008 (tekniken började utvecklas i Österrike 2002). Ingen anläggning finns i fullskala.	(Carlsson m.fl., 2013)
Berliner Wasser- betriebe /Airprex	Kristallise- ring	Struvit (tvättade kristaller) ”Berliner Pflanze”	Fällning av struvit direkt efter röt-kammaren. Magnesiumklorid används som magnesiumkälla. 5 % N, 27 % P ₂ O ₅ , 6 % MgO ² . Producerad struvit säljs som gödselmedel ¹ . Sedan april 2008 finns tillstånd att sälja produkten som gödselmedel ² .			¹ (Fransson m.fl., 2010) ² (Berliner Wasserbetriebe, 2013) ³ (Carlsson m.fl., 2013)

Teknik (Leverantör)	Princip	Slutprodukt – typ ”Namn”	Slutprodukt – information	Ev. biprodukt	Övrigt	Referens
BioCon (BioCon)	Kemisk fällning ¹ Jonbyte ^{2,3}	Järnfosfat ¹ Fosforsyra ^{2,3}	Förslag till återvinning av fosfor ur aska från slamförbränning genom att fosfor löses ur askan med syra och separeras ur laklösningen genom att: <ul style="list-style-type: none"> Fällas ut som järnfosfat I Utvinnas med jonbytare som fosforsyra^{2,3} 		BioCon tillverkar slamförbränningsanläggningar. Avvattnat slam torkas och bränns (värmenergin driver torkning av nytt slam). År 2002 hade tekniken för återvinning av fosfor ännu inte körts kontinuerligt under en längre period ¹ . Jonbytesprocessen har endast testats i pilotskala och osäkerheten är stor rörande kostnader och funktion ³ .	¹ (Ny Teknik, 2002). ² (Tideström m.fl., 2009) ³ (Lundin m.fl., 2004)
BioLeaching	Mikro-biologisk process	Biomassa med högt fosforinnehåll	Oxiderande bakterier bildar syra som lappar ut fosfor och metaller ur aska från slamförbränning. Bakterier som tar upp fosfor ur laklösningen avskiljs som biomassa med högt fosforinnehåll.			(Zimmermann & Dott, 2009) (Carlsson m.fl., 2013)
Biotech	Adsorption	Naturligt kalcium- och kiselhaltigt material som har förmåga att binda fosfor	Tekniken kan återvinna mer än 90 % av den fosfor som inte avskiljs i slamavskiljning el. biologisk rening, ca. 50-75 % av inkommande mängder.		Riktat sig till små avlopp.	(Carlsson m.fl., 2013)
Crystalactor® (DHV Water)	Kristallisering	Kalciumfosfat eller struvit ¹ Kalciumfosfat, struvit, kaliummagnesiumfosfat, magnesiumfosfat ²	Pellets. Rejekvatten efter avvattning av rötat slam härrörande från bio-P i en fluidiserad bädd där kristallisation sker, på t.ex. sandkorn som tillsätts, av kalciumfosfat eller struvit ¹ .			¹ (Carlsson m.fl., 2013) ² (Fransson m.fl., 2010)
Easy Mining	Serie kemiska processstag	Ammoniumfosfat	Gödselprodukten är väldigt löslig. Kräver att slamaskan innehåller minst 5 % fosfor för att vara lönsam.		Extrem storskalighet	(Carlsson m.fl., 2013)

Teknik (Leverantör)	Princip	Slutprodukt – typ ”Namn”	Slutprodukt – information	Ev. biprodukt	Övrigt	Referens
EkoBalans	Kemisk fällning	Struvit + ammoniumsulfat, blandas och granuleras till en gödselprodukt ¹ .	Struvitfällning på rejektivatten efter avvattning av slam från bio-P, ammoniak stripping av rejektivattnet och ammoniumsulfat framställs genom behandling med svavelsyra ¹ .		Pilotförsök på Öresundsverket, 2012-2013, för utvinning av fosfor ur rötslam. Struvit innehållande 12 % fosfor och med betydligt lägre halter tungmetaller än slam och handelsgödsel utvinns. Upp till 40 ton struvit beräknas utvinnas under 2013. Energiförbrukningen, per utvunnen mängd fosfor, är mindre än hälften så stor som för handelsgödsel fosfor ² .	¹ (Carlsson m.fl., 2013) ² (Webfinansier, 2013)
FIX-Phos	Adsorption	Kalciumfosfat	Kalciumsilikathydrat tillsätts som adsorbent i röt-kammaren. Fosfor bind som kalciumfosfat i slammet.			(Carlsson m.fl., 2013)
Fraunhofer IGB	Kristallisation	Struvit (NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻)	Elektrokemisk process med magnesiumelektrod används som magnesiumkälla		En pilotanläggning (flöde 1 m ³ /h) är i testfas (mars 2013).	(Fraunhofer IGB, 2013)
Krepro (Kemira)	Syralakning	Järnfosfat	Rötrest sönderdelas med syra och värme, vätska centrifugeras bort och ur vätskan fälls trevärd järnfosfat ut ¹ .	Torrsubstanshalten bränns i fjärrvärmeverk ¹ .	År 2002 hade tekniken ännu inte körts kontinuerligt under en lägre period, mer testning krävs ¹ . Pilotskala i Helsingborg, Sverige ² .	¹ (Ny Teknik, 2002) ² (Nieminen, 2010)
Mephrec	Termisk behandling	Fosfor kvar "askslaggen"	Aska från slamförbränning renas genom att tungmetaller förångas vid 2000 °C.	Tungmetallerna övergår i gas- eller vätskefas och kan avskiljas.		(Carlsson m.fl., 2013)

Teknik (Leverantör)	Princip	Slutprodukt – typ ”Namn”	Slutprodukt – information	Ev. biprodukt	Övrigt	Referens
NuReSys®	Kristallisation	100 % ren struvit ”BIOSTRU®”	Pellets, 1-3 mm i diameter. 5% N, 28% P ₂ O ₅ , 10% Mg ² . Magnesiumklorid används som magnesiumkälla ¹ . Två fullskaleanläggningar- mjölkindustri 2005, poatatisindustri 2008 ¹ .			¹ (Fransson m.fl., 2010) ² (NuReSys, 2013)
PÅSCH	Serie kemiska processsteg	Kalciumfosfat (även struvitfällning möjlig)	Fosfor lakas med syra från slamaska. Utlösta metaller separeras ur vätskefasen genom vätskeextraktion varefter fosfor fälls ut genom tillsats av kalk.			(Carlsson m.fl., 2013) (Montag, 2009)
PEARLTM (Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.)	Kristallisering	Struvit (kristaller, avvattnade och torkade) "Crystal Green®" (struvitkulor)	Pellets, 0,5-3,5 mm. 5 % N, 28 % P ₂ O ₅ , 10 % Mg, 0 % K. (Långsamtverkande gödselmedel, > 8 månaders frigöring). Granuler av en storlek som lämpar sig för spridning med gödselspridare ¹ . Upp till 8 mm stora struvitkorn ² . Magnesiumklorid, och vid behov natriumhydroxid, kan tillföras för att maximera utfällningen ³ . Struvitkulorna från Västra Strandens avloppsreningsverk i Halmstad innehåller 99 % struvit, vilket innehåller 13 % fosfor som löser sig långsamt. Fritt från smittämnen ³ .		Pilotförsök genomförs på Västra Strandens reningsverk i Halmstad (jan-feb 2013) – en av de första pilotanläggningarna i Europa. Ser flera fördelar med tekniken, bl.a. att internbelastning, slamvolym, kemikalieåtgång och spontan struvitfällning minskar. God resultat över lag, ca. 85-90 procent av fosfatfosforen avskiljs ur rejektet ³ . Fullskaleanläggning byggd i Slough i England ³ .	¹ (Carlsson m.fl., 2013) ² (Fransson m.fl., 2010) ³ (Cirkulation, 2013)
Phosedidi	Jonbyte	Fosforsyra	Utvinning av fosforsyra genom jonbytesteknik och elektrodialys.			(Carlsson m.fl., 2013)

Teknik (Leverantör)	Princip	Slutprodukt – typ ”Namn”	Slutprodukt – information	Ev. biprodukt	Övrigt	Referens
Phosnix (Unitika Ltd.)	Kristallise- ring	Struvit ”Green MAP II” (innehåller magnesium, kväve, fosfor, försumbara mängder tungmetaller) –säljs till gödselmedels- producent.	Rejektvatten efter avvattning av rötat slam härörande från bio-P behandlas med tillsatser av magnesiumklorid och natriumhydroxid i en särskild kristallisationsreaktor där struvitkristaller bildas ¹ . Avskiljningsgrad ² : <ul style="list-style-type: none"> • Ca. 90 % P • Ca. 90 % NH4-N Gödselmedelsproducenten säljer inte struviten direkt som gödselmedel utan justerar förhållandet mellan kväve, kalium och fosfor ² .	En del kväve avgår som ammoniak i processen.		¹ (Carlsson m.fl., 2013) ² (Fransson m.fl., 2010)
Phostrip	Kristallise- ring	Kalciumfosfat	Fosfatutlösning i en anaerob stripper av en delström av returslammet i bio-P följt av separation och utfällning av kalciumfosfat.	Slammet återförs till aktivslamsteget		(Carlsson m.fl., 2013)
Phoxnan	Nano- filtrering	Fosforsyra	Kombination av våtoxidation av slam vid lågt tryck (LOPROX) och nanofiltrering. Tungmetaller separera och fosforsyra återvinns ur permeatet genom nanofiltrering vid lågt pH.			(Tideström m.fl., 2009) (Aachen Universität)
Prisa	Kristallise- ring	Struvit	Struvitfällning på vätskan i överskottsslammet från bio-P (slamvaten) eller rejektivatten.			(Carlsson m.fl., 2013) (Cornel & Schaum, 2009)

Teknik (Leverantör)	Princip	Slutprodukt – typ ”Namn”	Slutprodukt – information	Ev. biprodukt	Övrigt	Referens
P-RoC	Kristallisering	Kalciumfosfat	Fosforåtervinningen är ca. 80 %. Återvunnen fosforprodukt kan användas i jordbruk samt fosfatindustri.			(Cornel & Schaum, 2009)
Prophos	Adsorption	Fosfat adsorberas på kalciumsilikat-hydrat				(Carlsson m.fl., 2013)
Recyphos	Adsorption	Adsorptionsmoduler	Fasta adsorptionsmoduler som byts ut med jämna mellanrum			(Carlsson m.fl., 2013)
Seaborne	Kristallisering	Struvit (amorft struvitslam med ca. 50 % TS-halt)	Flerstegsprocess för utvinning av fosfor ur rötslam: 1. Utlakning av fosfor och tungmetaller med svavelsyra och väteperoxid, 2. vätska och fast material separeras i en centrifug 3. Tungmetaller fälls ut med hjälp av natriumsulfid 4. Struvitfällning med magnesiumhydroxid och natriumhydroxid (pH-justering). Behöver behandlas för att passa spridning ¹ .	Tungmetallslam (farligt avfall) som innehåller de metaller som avskiljs i processen Organiskt slam med lågt pH (lägre fosforhalt och tungmetallhalt än om tekniken ej införts).	Fullskaleanläggning i drift sedan 2005 på avloppsverk i Tyskland. Processens olika delar ² : 1) RoHM (removal of Heavy metals): tungmetallfällning separeras från lösning 2) NRS1 (NutrientRemoval System): fosfor utvinns som struvit (utvärdering 2005: 50 % av P återvinns, bedömning för optimerad process 95 %) NRS2: ammoniumkväve utvinns som diammoniumsulfat (bedömning för optimerad process 85 %)	¹ (Carlsson m.fl., 2013) ² (Fransson m.fl., 2010)

Referenser

- Aachen Universität (2013) Hämta d från: http://www.isa.rwth-aachen.de/index.php?option=com_content&view=article&id=520:projekt-phoxnan&catid=210&Itemid=127 (2013-04-18)
- Berliner Wasserbetriebe (2013) Rohstoff-Recycling (http://www.bwb.de/content/language2/downloads/Produktblatt_MAP_web_A3.pdf). Hamta d från: <http://www.bwb.de/content/language2/html/4951.php> (2013-03-25)
- Carlsson, H., Hagerberg, D., Robinson, T., Tideström, H. (2013) Behandlingsmetoder för hållbar återvinning av fosfor ur avlopp och avfall. Slutrapport 2013-02-15. Tyrens AB.
- Cirkulation (2013) Fosforåtervinning pa forsok i Halmstad. Cirkulation VA-tidskriften Utgava 2-13 20 mars
- Cornel, P., Schaum, C. (2009) Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. Water Science & Technology–WST 59.6. IWA Publishing 2009.
- Fransson, L., Löwgren, S., Thelin, G., Ekobalans Fenix AB (2010) återvinning av näringsämnen från rötrest genom struvitfällning. Rapport SGC 218. Svenskt Gastekniskt Center.
- Fraunhofer IGB (2013) Hämta d från: <http://www.igb.fraunhofer.de/en/competences/physical-process-technology/nutrients-management/phosphorus-recovery.html> (2013-03-22)
- Levlin E. (2007) Phosphorus recovery from sewage sludge - Two-step leaching process with acid and base, Proceedings of Polish-Swedish seminars, Krakow Mars 17-19, 2005, Report No 13. Joint Polish - Swedish Reports, TRITA.LWR REPORT 3018, ISBN 978-91-7178-826-9, sid 71-80
<http://www2.lwr.kth.se/Forskningsprojekt/Polishproject/rep13/2stepleaching51.pdf>
- Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G.J., Zetterlund, H. (2004) Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options Resources, Conservation and Recycling Volume 41, Issue 4, July 2004, Pages 255–278
- Montag D. (2009) The PASH process for P-recovery and overview of the German Funding Programme “Recycling management of plant nutrients, especially phosphorus” Baltic 21 September 28, 2009, Berlin
http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/koordinierend/bs_naehrstoffage/baltic21/14_Montag.pdf
- Nieminen, J. (2010) Phosphorus recovery and recycling from municipal wastewater sludge. Aalto University, School of Science and Technology, Department of Civil and Environmental Engineering
Hamta d från: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/NIEMINE_N%202010%20Phosphorus%20Recovery%20and%20Recycling%20from%20Municipal%20Wastewater%20Sludge.pdf
- NuReSys (2013) Hamta d från: <http://www.nuresys.org/> (2013-03-26)
- Ny Teknik (2002) Tvist om basta slamrening. Stockholm Vatten vill återvinna fosfor utan förbränning. Av Niclas Köhler, Publicerad 8 maj 2002, Ny teknik.
Hamta d från: http://www.nyteknik.se/nyheter/it_telekom/allmant/article19366.ece
- Petzet, S., Peplinski, B., Bodkhe, S.Y., Cornel, P. (2011) Recovery of phosphorus and aluminium from sewage sludge ash by a new wet chemical elution process (SESAL-Phos-recovery process). Water Sci Technol. 2011 ;64 (3):693-9

- Schaum, C., Cornel, P., Norbert, J. Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Ash – A Wet Chemical Approach Darmstadt/Essen: Technische Universität Darmstadt/Ruhrverband. <http://www.sswm.info/content/advanced-nutrient-recovery>
- Scope Newsletter (2012) Number 88, September 2012. Hämtad från: <http://www.ceep-phosphates.org/Files/Newsletter/Scope%20Newsletter%2088.pdf>
- Tideström, H., Alvin, L. (2010) Fosforutvinning ur avloppsslam – finns tekniken idag? PM. Sweco Environment
- Tideström, H., Alvin, L., Jennische, U., Hultman, B. (2009) Fosforutvinning ur avloppsslam Teknik, miljö-, hälso- och klimateffekter Sweco Environment
- Universität Stuttgart (2012) Large-scale Application of Phosphorus (Struvite) Recovery from Digested Municipal Sludge http://www.iswa.uni-stuttgart.de/lsww/forschung/awt/aktuelle/link_Pilotanlage_MAP.en.html
- Webfinanser (2013) EkoBalans utvinner fosfor ut slam på Öresundsverket: Lyckade pilotförsök och fortsatt drift. Hämtad från <http://www.webfinanser.com/nyheter/2435784/ekobalans-utvinner-fosfor-ur-slam-pa-oresundsverket-lyckade-pilotforsok-och-fort/> (2013-03-25)
- Zimmermann, J., Dott, W. (2009) Sequenced bioleaching and bioaccumulation of phosphorus from sludge combustion – A new way of resource reclaiming Advanced Materials Research Vol. 71-73, sid 625-628.