

| | |
|--|-----------------------|
| Energimyndighetens titel på projektet – svenska Fosfor från avloppsslam i en cirkulär ekonomi | |
| Energimyndighetens titel på projektet – engelska Phosphorus from sewage sludge in a circular economy | |
| Universitet/högskola/företag VA SYD | Avdelning/institution |
| Adress Box 191, 201 21 Malmö | |
| Namn på projektledare Hans Bertil Wittgren | |
| Namn på ev övriga projektdeltagare Bo von Bahr, Erik Kärrman, Emma Lundin och Lena Rodhe (samtliga RISE) | |
| Nyckelord: 5-7 st slamspridning; slamförbränning; pyrolys; fosforutvinning; systemjämförelse | |

Förord

Detta förprojekt inom forskningsprogrammet RE:Source initierades på grund av att kommande certifieringsregler inom REVAQ och svensk lagstiftning, trots ständigt pågående uppströmsarbete, kan göra det svårt att sprida slam på åkermark i västra Skåne, liksom i andra regioner i Sverige. VA-branschen måste därför undersöka och förbereda sig för alternativ till dagens slamhantering, t.ex. förbränning eller pyrolys. Samtidigt kommer det fortsatt att vara en ambition att återföra näringsämnen, framförallt fosfor, från avloppsvatten till åkermark.

Förprojektet initierades av VA SYD och NSVA, som tillsammans behandlar avloppsvatten från 10 kommuner i västra Skåne (Malmö, Burlöv, Lund, Eslöv, Landskrona, Svalöv, Bjuv, Åstorp, Helsingborg och Båstad). VA SYD och NSVA har även delfinansierat förprojektet tillsammans med forskningsprogrammet RE:Source.

Projektet har haft en intressentgrupp bestående av:

Christopher Gruvberger, VA SYD

Ulf Nyberg, VA SYD

Pär Gustafsson, NSVA

Anders Persson, Sysav Utveckling AB

Per-Arne Nilsson, Malmö stad





















Per-Göran Andersson, Hushållningssällskapet Skåne

Sammanfattning

Nackdelar med direkt slamspridning, t.ex. förekomst av metaller och mikroföroreningar, kan förutom med uppströmsarbete åtgärdas genom att ta fram mer processade fosforprodukter från avloppsslammet. I denna rapport jämförs ett antal olika systemalternativ med avseende på fem hållbarhetskriterier. De olika systemalternativen är:

0. Befintlig slamhantering i Sverige: Slamspridning på åkermark (0A) och Tillverkning av anläggningsjord (0B).
1. Slamförbränning med fosforutvinning ur aska med olika metoder: AshDec (1A), Ash2®Phos (1B) och EcoPhos (1C).
2. Pyrolys av slam (2), där producerat biokol avses användas som jordförbättringsmedel.

Jämförelsen sammanfattas i nedanstående tabell, där '0A - Slamspridning på åkermark' utgjorde referensalternativ.

| Hållbarhetskriterier | Systemalternativ | | | |
|---|---|---|--|---|
| | 0A Slamspridning på åkermark | 0B Tillverkning av anläggningsjord | 1 Utvinning av P efter förbränning | 2 Produktion av biokol genom pyrolys |
| Flöden av tungmetaller till fosforprodukt |  |  |  |  |
| Energibehov |  |  |  |  |
| Klimatpåverkan |  |  |  |  |
| Teknikmognad |  |  |  |  |
| Fosforprodukternas egenskaper |  |  |  |  |

* Symbolen för '0B' har gjorts mindre för att indikera att det inte är en slamprodukt som avses, utan mineralgödsel.





















Slamförbränning med fosforutvinning och pyrolys befinner sig på en ganska låg teknikmognadsnivå och fler aktiviteter behövs för att dessa alternativ ska bli fullt ut bedömningsbara. Tre områden som identifierats som viktiga steg i processen för att välja inriktning är: (i) en utvidgad systemstudie som innefattar utvinning av fosfor i vattenbehandlingsdelen på avloppsreningsverk, (ii) tester i laboratorie- och pilotskala avseende slambehandling, förbränning, pyrolys och fosforutvinning, men också odlingsförsök med utvunna produkter, samt (iii) en komplett hållbarhetsanalys innehållande alla viktiga hållbarhetsaspekter, t ex ekonomi och socio-kulturella aspekter, som inte kunnat bedömas i denna studie.

Summary

Disadvantages with direct application of sewage sludge to arable land, for example presence of metals and micropollutants, might, in addition to by upstream work, be addressed by extraction of more processed phosphorus (P) products from sewage sludge. In this report, a number of system alternatives are compared with respect to five sustainability criteria. The system alternatives are:

0. Existing sludge management in Sweden: Sludge application to arable land (0A) and Production of construction soil (0B).
1. Incineration of sludge with phosphorus extraction from ashes with different methods: AshDec (1A), Ash2®Phos (1B) and EcoPhos (1C).
2. Pyrolysis of sludge (2), where produced biochar is intended for soil amendment.

The comparison is summarized in the following table, where '0A - Sludge application to arable land' is the reference alternative.

| <i>Sustainability criteria</i> | <i>System alternatives</i> | | | |
|-------------------------------------|---|---|--|---|
| | 0A Sludge application to arable land | 0B Production of construction soil | 1 Extraction of P after incineration | 2 Production of biochar after pyrolysis |
| Flows of heavy metals to P products |  |  |  |  |
| Energy use |  |  |  |  |
| Climate impact |  |  |  |  |
| Technology readiness |  |  |  |  |
| Characteristics of P products |  |  |  |  |

* The symbol for '0B' has been made smaller to indicate that it is not a sludge product that is referred to, but mineral fertilizer applied to arable land as a substitute.

Extraction of P after incineration of sludge, as well as pyrolysis, are at a modest technology readiness level, and further trials are required to judge the applicability of these alternatives. Three areas were identified as important to focus in order to make an informed choice: (i) an extended systems analysis, including extraction of phosphorus from the water flow in the wastewater treatment plant, (ii) trials in laboratory and pilot scale on sludge treatment, incineration, pyrolysis and phosphorus extraction, and also field trials with extracted products, and (iii) a complete sustainability analysis including all important aspects, e.g., economic and socio-cultural aspects, which could not be evaluated in this study.

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Inledning..... | 7 |
| 1.1 | Bakgrund..... | 7 |
| 1.2 | Syfte och mål | 8 |
| 1.3 | Avgränsningar | 9 |
| 2 | Metod..... | 10 |
| 3 | Systemalternativ..... | 11 |
| 3.1 | Systemalternativ 0 – Befintlig slamhantering i Sverige | 11 |
| 3.1.1 | 0A - Slamspridning på åkermark | 11 |
| 3.1.2 | 0B - Tillverkning av anläggningsjord..... | 12 |
| 3.2 | Systemalternativ 1 – Slamförbränning med fosforutvinning ur aska | 13 |
| 3.2.1 | Förbränning av slam | 14 |
| 3.2.2 | Monoförbränning eller samförbränning? | 15 |
| 3.2.3 | 1A - AshDec | 16 |
| 3.2.4 | 1B - Ash2®Phos..... | 17 |
| 3.2.5 | 1C - EcoPhos | 18 |
| 3.3 | Systemalternativ 2 – Pyrolys av slam | 20 |
| 3.4 | Jämförelse med P-REX | 20 |
| 4 | Resultat..... | 22 |
| 4.1 | Flöden av tungmetaller till fosforprodukt | 22 |
| 4.1.1 | 0A - Slamspridning på åkermark | 22 |
| 4.1.2 | 0B - Tillverkning av anläggningsjord..... | 24 |
| 4.1.3 | 1A - AshDec | 24 |
| 4.1.4 | 1B - Ash2®Phos..... | 24 |
| 4.1.5 | 1C - EcoPhos | 24 |
| 4.1.6 | 2 - Pyrolys | 24 |
| 4.1.7 | Jämförelse av systemalternativen..... | 25 |
| 4.2 | Energibehov och klimatpåverkan | 25 |
| 4.2.1 | 0A - Slamspridning på åkermark | 25 |
| 4.2.2 | 0B – Tillverkning av anläggningsjord | 26 |
| 4.2.3 | 1A – AshDec..... | 27 |
| 4.2.4 | 1B - Ash2®Phos..... | 28 |
| 4.2.5 | 1C – EcoPhos | 30 |
| 4.2.6 | 2 – Pyrolys | 31 |
| 4.2.7 | Jämförelse av systemalternativen..... | 32 |
| 4.3 | Teknikmognad | 34 |
| 4.3.1 | 0A - Slamspridning på åkermark | 35 |
| 4.3.2 | 0B – Tillverkning av anläggningsjord | 35 |
| 4.3.3 | 1A – AshDec..... | 35 |
| 4.3.4 | 1B - Ash2®Phos..... | 35 |
| 4.3.5 | 1C – EcoPhos | 35 |
| 4.3.6 | 2 – Pyrolys | 36 |
| 4.3.7 | Jämförelse av systemalternativ..... | 36 |
| 4.4 | Fosforprodukternas egenskaper..... | 36 |
| 4.4.1 | Fysiska och kemiska egenskaper | 37 |
| 4.4.2 | Växttillgänglighet..... | 37 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 4.4.3 | Jämförelse av systemalternativen..... | 39 |
| 5 | Diskussion..... | 40 |
| 6 | Slutsatser..... | 43 |
| 7 | Fortsatt arbete..... | 45 |
| 8 | Referenser..... | 46 |
| 8.1 | Tryckta och elektroniska källor..... | 46 |
| 8.2 | Personlig kommunikation..... | 48 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

År 2014 spreds 25 % av Sveriges avloppsslam på åkermark (Naturvårdsverket & SCB, 2016). Andra viktiga användningsområden var som komponent i anläggningsjord (29 %) och för deponitäckning (24 %). Totalt innehåller det svenska avloppsslammet ca 6 000 ton fosfor. Enligt en bedömning skulle slam kunna ersätta 80-90 % av mineralgödselimporten, om samtidigt gödselhanteringen blev något effektivare (REVAQ, 2015).

År 2012 fick Naturvårdsverket ett uppdrag från regeringen om hållbar återföring av fosfor. Uppdraget redovisades 2013 och innebär ökade ambitioner beträffande återföring av fosfor från slam, och som etappmål för 2018 föreslogs (Naturvårdsverket, 2013):

”Minst 40 procent av fosfor i avlopp tas tillvara och återföres som växtnäring till åkermark utan att detta medför en exponering för föroreningar som riskerar att vara skadlig för människor eller miljö.”

Att återföringen inte skall innebära exponering för skadliga föroreningar konkretiseras genom att man även föreslår skärpta gränsvärden för ett antal olika ämnen, framförallt tungmetaller (Naturvårdsverket, 2013). Exempelvis föreslås för kadmium att det aktuella gränsvärdet 2 mg/kg TS (från 1998) succesivt skall skäras till 1 (2015), 0,9 (2023) respektive 0,8 mg/kg TS (2030). Om fosforinnehållet antas vara 26 g/kg TS (medelvärde 2014, Naturvårdsverket & SCB, 2016) motsvarar dessa gränsvärden Cd/P-kvoterna 38 (2015), 35 (2023) respektive 31 mg Cd/kg P. Om inte redan uppnådda, är det troligt att fortsatt aktivt uppströmsarbete, inte minst inom ramen för den REVAQ-certifiering som många avloppsreningsverk är anslutna till, kan göra att merparten av Sveriges avloppsslam kommer att klara gränsvärdena.

Vidare föreslås gränsvärden för tillförsel av olika ämnen till åkermark. För kadmium innebär det föreslagna gränsvärdet för 2030, 0,35 g/(ha*år), att vid full fosforgiva (22 kg/ha*år) skulle Cd/P-kvoten behöva vara 16 mg Cd/kg P i slammet. Detta värde kommer vara mycket svårt att uppnå, och skulle då innebära att full fosforgiva inte kan ges med slam, vilket i sin tur skulle innebära svårigheter att få avsättning för slammet.

I skrivande stund (februari 2017) har regeringen fortfarande inte föreslagit riksdagen att göra några förändringar i lagstiftningen, men väl medvetna om att skärpta krav kan komma har VA-branschen börjat se över möjligheterna att sprida slam på åkermark i framtiden, samt börjat utreda alternativ, t.ex. förbränning och pyrolysis.

I Nederländerna förbränns i stort sett allt slam, och även i Tyskland och Schweiz är slamförbränningen omfattande (Eurostat, 2012). Snarare än att man ifrågasatt kvaliteten på slammet, beror valet av förbränning på att man inte har behov eller möjlighet att använda slammet då gödselbehovet redan täcks av stallgödsel. Hittills har inte någon nämnvärd utvinning av fosfor från slamaska förekommit, men det finns flera metoder under utveckling och som testats i pilotskala (P-REX, 2013). Dessutom har i Tyskland regeringen i januari 2017 lagt fram ett förslag till avloppsslamförordning som ställer krav på att reningsverken skall börja förbereda för fosforåtervinning (Cirkulation, 2017), vilket ytterligare kan förväntas stimulera teknikutvecklingen.

Förbränning med fosforutvinning ur aska kommer att vara dyrare och mer energi- och/eller kemikaliekrävande än dagens svenska slamhantering, men det kan också innebära förbättrade möjligheter att göra kvalitetssäkrade produkter som liknar de mineralgödselmedel som efterfrågas av lantbruket. Separat slamhygienisering kommer inte att behövas och organiska mikroföroreningar kommer att destrueras. En produktifiering som innebär väsentligt mindre volymer, av slamfosfor men även av stallgödsel fosfor, kan även göra längre transporter av fosforgödningsmedlet möjlig.

Hur man än ser på hur slam bör tas om hand i framtiden är det viktigt att fosfor hanteras för att ingå i en cirkulär ekonomi, då ingen ersättning för fosfor finns och tillgången på jungfrulig fosforråvara är begränsad (REVAQ, 2015).

1.2 Syfte och mål

Projektet syftar till att jämföra olika systemalternativ för hantering av slam, med avseende på ett antal hållbarhetskriterier.

De olika systemalternativen är:

0 - Befintlig slamhantering i Sverige

- OA - Slamspridning på åkermark
- OB - Tillverkning av anläggningsjord

1 - Slamförbränning med fosforutvinning ur aska

Mono- eller samförbränning med olika metoder för P-utvinning:

- 1A - AshDec
- 1B - Ash2®Phos
- 1C - EcoPhos

2 - Pyrolys av slam

Producerat biokol avses användas som jordförbättringsmedel.

De olika hållbarhetskriterierna är:

- Flöden av tungmetaller till fosforprodukt - substansflödesanalys
- Energiförbrukning - energiflödesanalys
- Klimatpåverkan - utsläpp av växthusgaser omräknade till CO₂-ekvivalenter
- Teknisk mognad - kvalitativ analys
- Fosforföreningars egenskaper som gödningsmedel - kvalitativ analys

De övergripande målen med projektet är följande:

- Ta fram en inriktning för cirkulär hantering av fosfor i västra Skåne (VASYDs och NSVAs medlemskommuner).
- Finna den mest hållbara systemlösningen för att återföra fosfor från avloppsslam.
- Identifiera vilka kommande steg som behövs för att implementera en fullskalig hantering.

1.3 Avgränsningar

Analysen av systemalternativen utgick från ett rötat och avvattnat slam färdigt att transportera, d. v. s. ett befintligt slam, och att inga ändringar i avloppsreningsprocessen antogs. Mot denna avgränsning kan invändas att den inte tar hänsyn till att ett optimalt förfaringsätt för att utvinna fosfor kan vara att även modifiera avloppsreningsprocessen. Därför är det vår avsikt att fortsätta denna studie, och därvid vidga systemgränserna till att även omfatta relevanta delar av avloppsreningsprocessen.

Studien avser systemanalys av återföring av fosfor till åkermark genom olika extraktionsalternativ från avloppsslam. Studien omfattar inte total ersättning av mineralgödsel när det gäller kväve, kalium eller andra näringsämnen, samt organiskt material.

Analysen har begränsats till att utvärdera systemalternativen med avseende på endast fyra hållbarhetskriterier. Detta i viss mån för att projekttiden varit kort (4 månader), men också för att det finns ett mycket begränsat underlag för exempelvis en mer djuplodande bedömning av ekonomiska aspekter. Förutom flöden av tungmetaller och energibehov finns andra miljöaspekter, t ex flöden av mikroföroreningar. Hälsa och hygien är viktigt att beakta utifrån risken för smittspridning. Teknisk funktion kan vidare analyseras genom att jämföra robusthet. Därtill bör läggas de socio-kulturella aspekterna så som hur allmänheten ser på användning av fosforprodukter och hur organisatoriska samt institutionella aspekter påverkar alternativen. I kapitel '5. Diskussion' tar vi övergripande upp dessa övriga aspekter.

2 Metod

Metoden som använts är systemanalys i följande steg:





- Val av hållbarhetskriterier
- Val av systemalternativ
- Analys och jämförelse av systemalternativ
- Tolkning av resultat och diskussion

I denna systemanalys har främst fem hållbarhetskriterier analyserats. Dessa har valts utifrån tillgänglighet av data och erfarenhet av de systemalternativ som ännu inte finns etablerade på marknaden i fullskala.

1. Flöden av tungmetaller till fosforprodukt
2. Energibehov
3. Klimatpåverkan
4. Teknikmognad (Technology Readiness Level)
5. Fosforprodukternas egenskaper (för spridning och gödseffekt)

Hållbarhetskriterierna skapade ett ramverk i vilket de utvalda systemalternativen jämfördes med alternativ 'OA - Slamspridning på åkermark' utifrån en skala med glada eller ledsna "smileys" (Tabell 1), där dock 'OA - Slamspridning på åkermark' gavs omdömet 'Bättre än' avseende kriteriet 'Teknikmognad'.

Tabell 1. Skala för jämförelse av systemalternativen.

| <i>Bättre än 'OA - Slamspridning på åkermark'</i> | <i>Motsvarande 'OA - Slamspridning på åkermark'</i> | <i>Sämre än 'OA - Slamspridning på åkermark'</i> | <i>Tillräckligt underlag för bedömning saknas</i> |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |

För att bedöma processernas totala energibehov och miljöpåverkan gjordes en screening-LCA som fokuserade på klimatpåverkan (CO₂-ekvivalenter/kg P) och energibehov (MJ/kg P). I den analysen ingick belastningen från tillverkning av förbrukade kemikalier samt förbrukning/produktion av energibärare. Transporter är medtagna i processerna på två sätt, dels där de utgör en egen aktivitet, t.ex. transport av slam till åkermark, dels de transporter som finns inbyggda i LCA-mjukvaran SimaPro (SimaPro, 2016). De senare transporterna utgörs av vissa standardtransporter till och från fabriker då kemikalier tillverkas m.m. Dessa brukar vara av liten betydelse jämfört med det producerade systemets primära funktion, och så antas fallet vara även här.

3 Systemalternativ

I denna studie betraktas alternativ för att återföra fosfor till jordbruksmark genom extrahering av fosfor från avloppsslam. Alternativerna med fosforutvinning från avloppsslam jämförs med ett befintligt implementerat system som vi kallar 0A där fosfor återförs till åkermark genom direkt slamspridning. Ytterligare ett system som redan finns implementerat och som används i fullskala idag finns också med i jämförelsen, alternativ 0B. Detta alternativ bygger på produktion av anläggningsjord och eftersom fosfor då inte återförs till jordbruket, innefattar det alternativet även produktion av motsvarande mängd fosfor i form av mineralgödsel för att täcka jordbrukets fosforbehov. Alternativ 1 innebär fosforutvinning från slamaska efter förbränning av slam. Tre olika varianter av fosforutvinning ur aska presenteras som 1A, 1B och 1C i Tabell 2. Alternativ 2 innebär pyrolys av torkat slam med produktion av biokol.

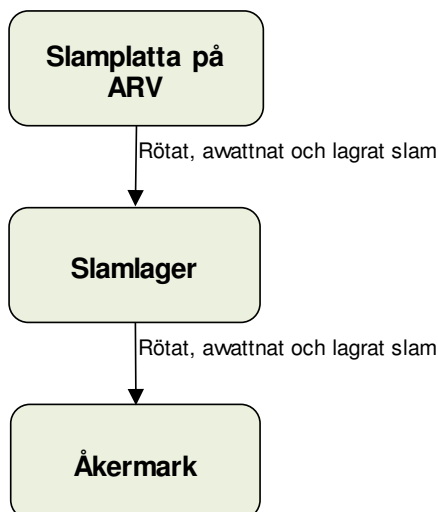
Tabell 2. De studerade systemalternativen. 0A är det befintliga alternativ som de övriga alternativen jämförs med.

| Alternativ | Beskrivning |
|------------|--|
| 0A | Slamspridning på åkermark |
| 0B | Tillverkning av anläggningsjord – ej kretslopp av fosfor, varför mineralgödsel tillföres åkermark. |
| 1A | AshDec: Utvinning av P ur aska från slamförbränning efter upphettning av askan. |
| 1B | Ash2Phos: Utvinning av P ur aska från slamförbränning efter utlakning med syra. |
| 1C | EcoPhos: Utvinning av P ur aska från slamförbränning efter utlakning med syra. |
| 2 | Pyrolys av torkat slam. |

3.1 Systemalternativ 0 – Befintlig slamhantering i Sverige

3.1.1 0A - Slamspridning på åkermark

Alternativet innebär slamspridning direkt på åkermark, vilket är vanligt förekommande i Sverige (Figur 1). Ca 25 % av den totala mängden avloppsslam återförs till åkermark (Naturvårdsverket & SCB, 2016), och det antas att dess fosforinnehåll nyttiggörs på lång sikt.



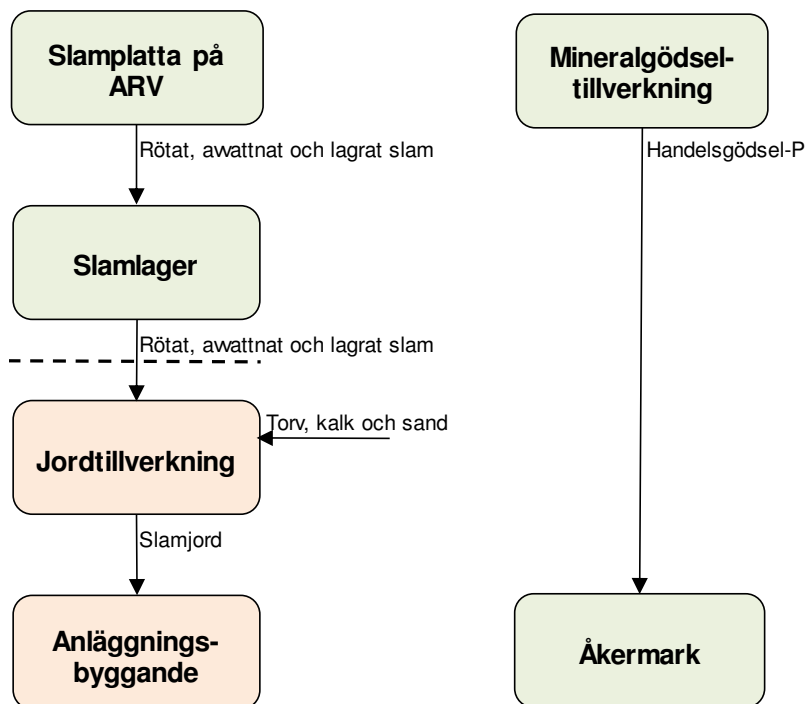
Figur 1. Systemalternativ OA - Slamspridning på åkermark.

3.1.2 OB - Tillverkning av anläggningsjord

Alternativet innebär att avloppsslammet går till jordtillverkning, och att jorden används till anläggningsbyggande (**Fel! Hittar inte referenskälla.**). Avloppsslammet fungerar generellt sett bra till denna applikation, men den tillverkade jorden tenderar till att bli onödigt näringsrik med avseende på fosfor, eftersom avloppsslammet är fosforrikt och inblandningen av slam ofta är riklig hos de jordtillverkare som använder avloppsslam i anläggningsjord. Jordtillverkning svarar för ungefär 29 % av slamhanteringen i Sverige (Naturvårdsverket & SCB, 2016).

Eftersom anläggningsjorden inte används på produktiv åkermark så går fosfor förlorad, och måste ersättas med fosfor i form av mineralgödsel, därför det kompletterande systemet i **Fel! Hittar inte referenskälla.** Alternativet skall ses som kvittblivning och uppfyller inte kraven i miljömålet "God bebyggd miljö", som bl. a. inkluderar resurshushållning. Beräkningarna angående mineralgödsel, för att ersätta fosfor som går förlorad, inkluderar enbart fosfordelen, alltså inte kväve och andra näringsämnen eller organiska material.

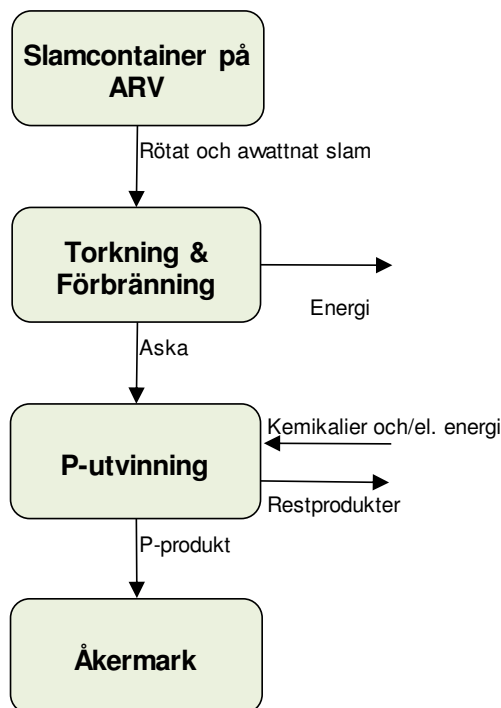
Som framgår av **Fel! Hittar inte referenskälla.** har jordtillverkningen och anläggningsbyggandet lagts utanför systemgränsen, då annars en motsvarande jordtillverkning skulle behöva ingå i de andra alternativen för att uppnå jämförbarhet. Förutom mineralgödsetillverkning ingår således transport av slam till jordtillverkning, samt lagring av slam på slamplatta i sex månader, i detta alternativ.



Figur 2. Systemalternativ OB - Tillverkning av anläggningsjord (ej kretslopp av fosfor).

3.2 Systemalternativ 1 – Slamförbränning med fosforutvinning ur aska

Alternativ 1 innebär fosforutvinning ur aska från antingen en monoförbränningsprocess eller en samförbränningsprocess av avloppsslam (Figur 2). I detta projekt har tre tekniker för fosforutvinning ur aska studerats: AshDec (1A), Ash2[®]Phos (1B) och EcoPhos (1C).



Figur 2. Systemalternativ 1 - Slamförbränning (monoförbränning) med fosforutvinning ur aska.

3.2.1 Förbränning av slam

Utgångspunkten för de tre undersökta fosforutvinningsprocesserna 1A, 1B och 1C i systemalternativ 1 är en aska från slamförbränning. Eftersom förbränningen och efterföljande fosforutvinningsprocess är två separata steg så studeras slamförbränningen gemensamt för alla tre processerna. Det viktigaste kravet vid förbränningen är att få fram en aska med så hög fosforhalt som möjligt för att få bästa möjliga totalekonomi, och det är av mindre vikt på vilket sätt förbränningen genomförts (se avsnitt '3.2.2. Monoförbränning eller samförbränning?'). Lokala faktorer och ekonomi bör styra hur askan "produceras". De viktigaste aspekterna då är om slammet skall mono- eller samförbrännas, och i det senare fallet vilket stödbränsle som i så fall skall användas.

Slamförbränning har studerats i tidigare projekt, speciellt ett projekt som slutredovisades för VASYD och NSVA i december 2015 (Ramböll, 2015a och 2015b). I projektet utvärderades möjligheten att lokalisera en anläggning i Skåne för slamförbränning. Från det projektet har övergripande data om slamförbränningens energibalans hämtats. I rapporten (Ramböll, 2015a) redovisas att energiöverskottet från slamförbränningen beräknats till 11 GJ/ton TS, vilket omräknat, under antagandet 3 % P/kg TS, blir ca 370 MJ/kg P. Detta värde har använts i denna studie.

Observera att Ramböll-projektet räknade på monoförbränning och att en del av värmeenergin från förbränningen då måste användas för att torka slammet innan förbränning. Det går också att samförbränna genom att använda ett stödbränsle, och då krävs inte denna torkning. I denna studie har vi valt att anta monoförbränning, eftersom bra data fanns tillgängliga för denna process (Ramböll, 2015a).

3.2.2 Monoförbränning eller samförbränning?

I en del tidigare rapporter (t.ex. Tyréns, 2013) har det hävdats att fosforåtervinning från slamaska kräver en föregående monoförbränning, d.v.s. att det avvattnade och torkade avloppsslammet förbränns som enda bränsle i en panna. Monoförbränning kan ske i en panna byggd för ändamålet, eller att en redan befintlig avfallspanna används och slam förbränns kampanjvis i denna. Dock har denna studie inte visat något stöd för att monoförbränning är ett krav för någon av de studerade processerna.

Det viktigaste för att få en bra systemlösning är att den aska som skall behandlas har en så hög fosforhalt som möjligt, så att man får ut en bra fosforprodukt, samt att man får största möjliga nytta av den el/värme och de tillsatskemikalier som används i processen, och därmed håller nere kostnaderna. Det är således av mindre betydelse i vilken typ av förbränningsprocess askan tillkommit men av stor betydelse vilken koncentration av fosfor som föreligger i askan. Om samförbränning sker så skall det andra bränslet ha så låg askhalt som möjligt så att fosfor inte späds ut i den slutgiltiga askan. Fosforhalter på runt 4-5 % och högre är en bra utgångspunkt för dessa processer.

Att monoförbränning inte är ett absolut krav är positivt för de studerade teknikerna eftersom det då blir lättare att få fram en slamaska genom att t.ex. använda en redan befintlig avfallspanna. Utmaningen blir att hitta ett bränsle att samförbränna med som har de rätta egenskaperna med avseende på förbränning, främst låg askhalt och låg halt av föroreningar med hänsyn till den process som skall tillämpas på askan. Viktigt kan också vara energiinnehållet i bränslet man samförbränner med eftersom ett bränsle med högt energiinnehåll kan minska behovet av torkning av slammet innan förbränning.

En lösning kan vara att samförbränna slam i en avfallspanna tillsammans med t.ex. träflis, som har askhalter på knappt 1 % (Tabell 3). Det går bra att förbränna flis i en avfallspanna, men inte tvärtom, d.v.s. avfall i en flispanna. Anledningarna till detta är både tekniska och juridiska. Träflis är dock ett relativt dyrt bränsle och det finns andra bränslen som också skulle fungera, men som har något högre askhalt, t.ex. grot. Det är också möjligt att samförbränna slammet med avfall, förutsatt att föroreningarna i avfallet inte slutligen hamnar i fosforprodukten. Det "renaste" avfallsbränslet är RT-flis, d.v.s. flisat returträ (krossade lastpallar, målad plank mm). Samförbränning med RT-flis studerades i ett projekt där EasyMining deltog (Bäfver m.fl., 2013). I rapporten finns även ett resonemang om att AshDec-processen kräver monoförbränning men detta dementeras av representanter för AshDec.

Tabell 3. Askhalter i några olika bränslen

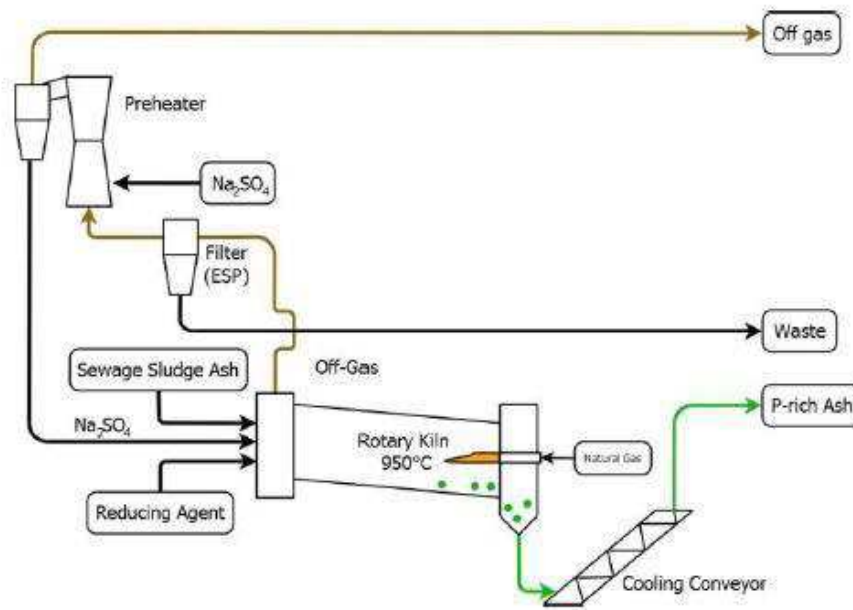
| Bränsle | Askhalt, % | Typ | Källa |
|-------------------------------|------------|---|--|
| Torrflis, sågspån, träpellets | 0,8 | | |
| Salixflis | 1,0 | Biobränsle | Svebio, 2014 |
| Grot (grenar och toppar) | 1,5 | | |
| Barkflis | 3 | | |
| Returträflis | 6 | Avfallsbränsle (målat trä mm) | Strömberg och Herstad Svärd, 2012 (tab. 3.3.1) |
| Avfall | 21 | Avfallsbränsle (restavfall från hushåll och verksamheter) | Avfall Sverige, 2014 (tab. 4) |

Förbränning av avloppsslam tillsammans med restprodukter från skogsindustrin kan även möjliggöra utvinning av kalium och skapa en PK-produkt. Här borde finnas potential att utmana den nuvarande Cd/P-kvoten för PK-mineralgödsel som normalt ligger på 30 mg Cd/kg P (Blomberg, personlig kommunikation, 2016).

3.2.3 1A - AshDec

AshDec-processens utgångsmaterial är aska från slamförbränning. Därefter kan AshDec-processen ta vid för att processa slamaskan, genom att upphetta den i en roterugn. I korthet innebär processen att slamaskan förs in i den roterande ugnen som värms med naturgas eller på annat sätt (Figur 4). Som reduktionsmedel används Na_2SO_4 och en mindre mängd torkat (ej förbränt) slam. Den första generationens AshDec-process använde CaCl_2 , KCl och MgCl_2 som tillsatskemikalier. Detta medförde en mycket bra metallavskiljning men tyvärr fungerade gödselprodukten, Mg-Ca-fosfat inte så bra på alkaliska jordar, vilket medförde att man utvecklade en andra generation av processen.

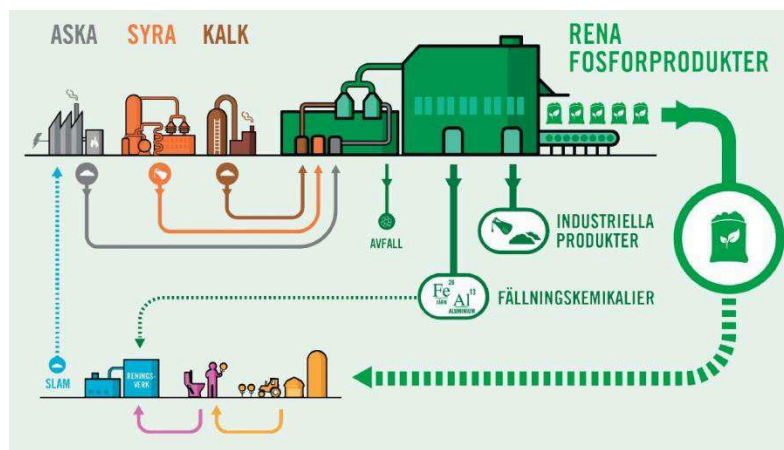
Den andra generationen använder istället Na_2SO_4 eller K_2SO_4 som tillsatskemikalie vilket resulterar i en mer användbar gödselprodukt, så kallad Rhenania-fosfat, CaNaPO_4 eller CaKPO_4 om man använder kalium som tillsats. Den negativa sidan av detta val är att tungmetallavskiljningen inte blir riktigt lika hög som i den första generationen, men förmodligen tillräckligt hög.



Figur 4. Översiktligt processschema av AshDec-processen (Källa: P-REX, 2013).

3.2.4 1B - Ash2@Phos

Företaget EasyMining Sweden AB, har arbetat med processutveckling för fosforutvinning ur olika råvarukällor under ett antal år och är nu en del i Ragn-Sells koncernen. Den process som lanseras för fosforutvinning ur slamaska benämns Ash2®Phos (Figur 5). Processen kan hantera slamaska med olika fosforinnehåll. Askan kan komma från monoförbränning eller samförbränning av avloppsslam. Det är fördelaktigt att fosforhalten är så hög som möjligt (se avsnitt '3.2.2. Monoförbränning eller samförbränning?').

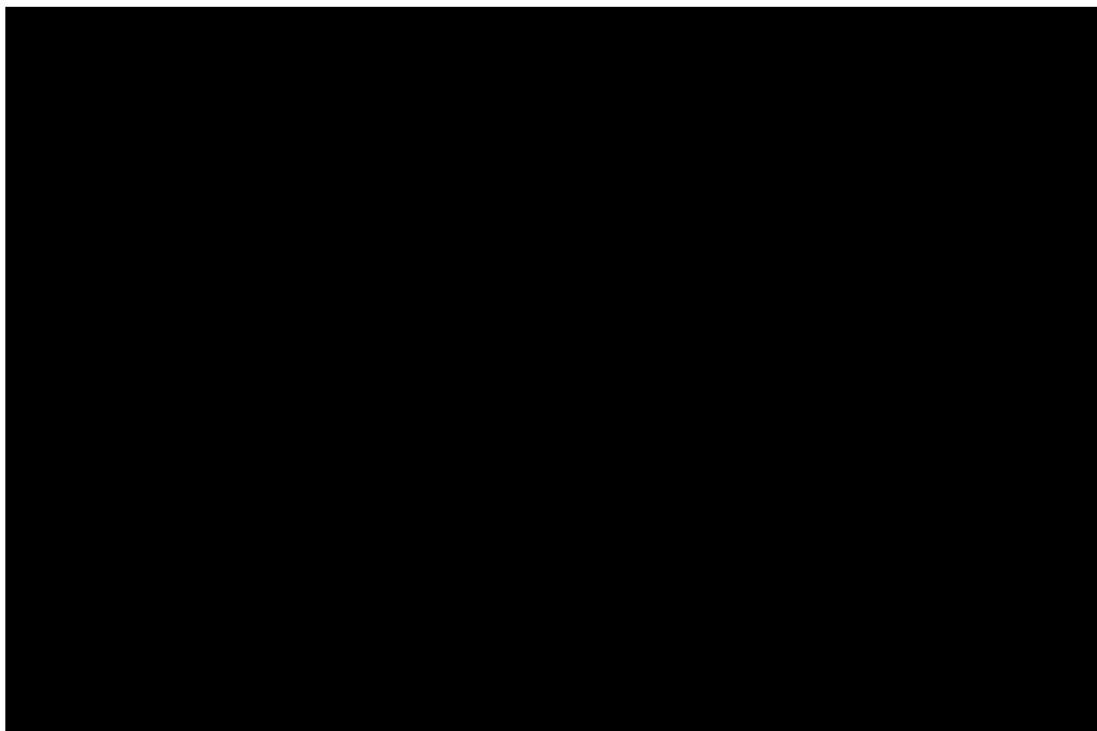


Figur 5. Översikt av materialflöden i Ash2®Phos-processen (Källa: Enfält, personlig kommunikation, 2016).

Det första steget i processen innebär att askan löses upp i saltsyra varefter utvinningen av de upplösta ämnena sker i ett antal successiva kemiska processteg, bl.a. kemisk

fällning. Förutom syra tillsätts också kalk i processen. I vilken form den utvunna fosfor kommer ut ur processen kan väljas bland: mono/di-kalciumfosfat (foderfosfat), mono/di-ammoniumfosfat (fosforgödselmedel), fosforsyra eller superfosfat (fosforgödselmedel). Renheten på fosforprodukterna är hög med <1 mg Cd per kg P oberoende av askans egenskaper.

Om ammoniumfosfat produceras så blir det av en teknisk kvalitet som innehåller mer fosfor än genomsnittlig mineralgödselkvalitet, och som är helt vattenlöslig. Förutom fosforprodukten får man ut järn- och aluminiumlösningar, järnklorid och aluminiumsulfat/klorid, d.v.s. fällningskemikalier som används för fosforfällning i reningsverk. Används svavelsyra istället för saltsyra får man även ut gips som eventuellt också kan användas som en resurs. De råvaror som tillsätts blir följaktligen en delmängd av de utgående produkterna (Figur 6).



Figur 6. Översiktligt processschema för Ash2®Phos-processen (Källa: Enfält, personlig kommunikation, 2016).

3.2.5 1C - EcoPhos

EcoPhos utgångsmaterial är aska från förbränt avloppsslam eller från lågkvalitativa mineraltillgångar (EcoPhos hemsida). Fullskaleanläggningar som behandlar mineralkällor av lägre kvalitet finns i Peru, och byggnation pågår i Namibia, Egypten, Indien och Kazakstan. För denna studie är dock bara fosforutvinning ur slamaska relevant. En demonstrationsenhet byggd i moduler finns i Bulgarien, med kapacitet att behandla 4000 – 8000 ton slamaska/år (de Ruiter, personlig kommunikation, 2017).

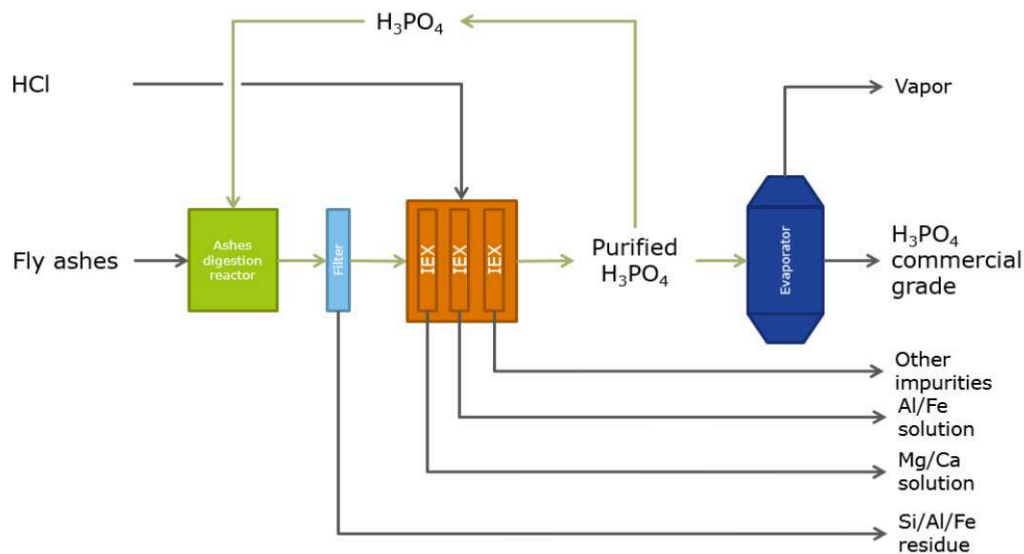
Som konstateras ovan i avsnitt '3.2.2. Monoförbränning eller samförbränning?' så är det inte avgörande hur förbränningen ägt rum, huvudsaken är att fosforhalten är någorlunda hög, och att eventuell samförbränning då har skett med ett bränsle med låg

askhalt. Enligt processansvarig för EcoPhos-processen bör fosforhalten i askan vara runt 9 % för att processen skall vara lönsam (de Ruiten, personlig kommunikation, 2017). Lägre koncentrationer är möjliga, det beror på den finansiella modellen, men ju högre P-koncentration i askan desto bättre.

Processen börjar med att en syra tillsätts, antingen H_3PO_4 eller HCl , för att fälla ut inerta beståndsdelar ur askan (P-REX, 2013). Fosforsyra rekommenderas för att extrahera fosfor ur avloppsslamaska (de Ruiten, personlig kommunikation, 2017). Ju mer som fällt ut ur askan desto större kostnader för att deponera detta restmaterial, framförallt om askan har höga halter av kiselöreningar. Efter avskiljning av fällningar återstår en lösning med lösta fosfater och metaller. Metallerna fångas genom jonbyte med HCl (Figur 7). Cd/P -kvoter lägre än 10 kan uppnås i den slutliga produkten (de Ruiten, personlig kommunikation, 2017).

Hur restprodukterna från processen hanteras beror av förutsättningarna i den region där processen tillämpas. Restprodukterna som uppstår är:

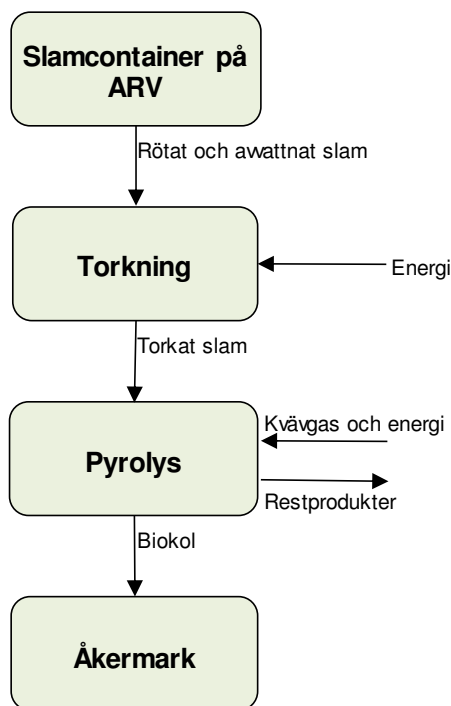
- En kloridlösning med tungmetaller som skall tas om hand på lämpligt sätt
- Kalciumklorid ($CaCl_2$) – kan nyttjas som vägsalt, m.m. Användningen beror på de lokala behoven för denna baskemikalie. Ett alternativ är att tillföra H_2SO_4 , svavelsyra, för att producera saltsyra HCl som kan återanvändas i jonbytesreaktionerna i EcoPhos-processen, samt gips.
- Aluminium eller järn-kloridlösning (beror på använda fällningskemikalier på reningsverket) – kan återanvändas för kemisk fällning i avloppsreningsverk.
- Fast avfall av järn- eller aluminiumsilikater, vilket uppstår i början av processen, före jonbytarsteget. Sammansättningen av det fasta avfallet bestäms av de ingående kemikalierna.



Figur 7. Processchema för produktion av fosforsyra med EcoPhos (Källa: P-REX, 2013).

3.3 Systemalternativ 2 – Pyrolys av slam

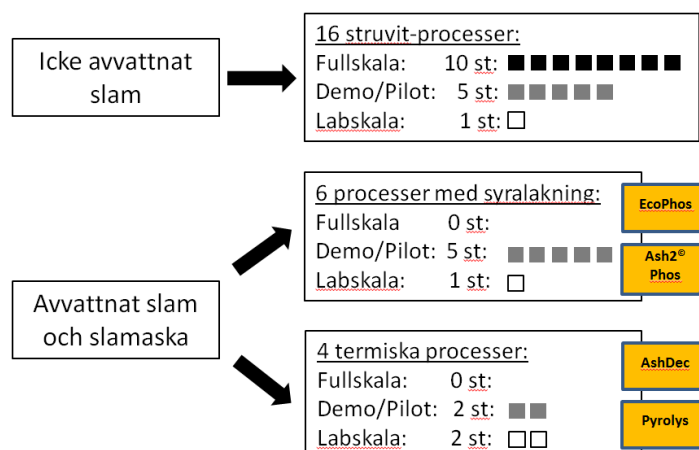
Alternativ 2 är pyrolys vilket innebär att slam torkas och därefter pyrolyseras (upphettnings utan syretillförsel) i hög temperatur under en viss tid (Figur 8). Den pyrolysisprocess som studerats är 'EkoBalans pyrolysisprocess eco:S' (Thelin, 2014). Efter processen återstår en koksåterstod, s.k. biokol. Tjärämnen och vissa metaller, bl. a. kadmium följer med den gas som drivs bort i processen.



Figur 8. Systemalternativ 2 - Pyrolys av slam.

3.4 Jämförelse med P-REX

P-REX var ett stort EU-projekt som slutfördes 2013 (P-REX, 2013), vars inriktning var att kartlägga och utveckla processer för fosforåtervinning. Relationen mellan de processer som studerades i P-REX och de som ingår i detta projekt åskådliggörs i Figur 9. Som framgår har detta projekt processer representerade i båda kategorierna av processer som hanterar avattnat slam och slamaska. Figuren visar också antal och utvecklingsnivå för de processer som var med i respektive kategori inom P-REX. Bedömningen av utvecklingsnivå är den bedömning som projektet gjorde i slutrapporteringen 2013, och det är möjligt att en del av processerna har utvecklats och borde ha ett högre betyg idag.



Figur 9. Kategorier av projekt i P-REX och i detta projekt (gulmarkerade). Som framgår har struvitprocessen hunnit längst i utvecklingen, där man utvinner P redan i avloppsreningsprocessen. Observera att bedömningen Fullskala, Demo/Pilot respektive Labskala gjordes 2013.

4 Resultat

4.1 Flöden av tungmetaller till fosforprodukt

Oavsett vad man gör med slammet från avloppsreningsverk så är uppströmsarbetet bra för både recipienten och processen i reningsverket, som annars riskerar att bli påverkade negativt av föroreningar i spillvattnet. Uppströmsarbetets drivkraft har traditionellt varit att få ett så rent slam så möjligt. En positiv bieffekt är att även recipienten tjänar på uppströmsarbete, genom att föroreningar som elimineras vid källan, och inte fastnar i slammet, inte heller kommer att följa med utgående vatten till recipienten.

Halterna av kadmium och kvicksilver i avloppsslammet har sjunkit kraftigt de senaste 30 åren, och man närmar sig nu en asymptotisk fas i minskningstakten där de lättaste åtgärderna är avklarade (detta gäller främst REVAQ-certifierade avloppsreningsverk). I takt med att punktkällor till föroreningar spåras upp och elimineras så kommer spillvattnet från hushållen att stå för en allt större andel av metallerna till avloppsreningsverken. För de verk som i stort sett åtgärdat alla kända punktutsläpp av kadmium, så står hushållen för ca 75 % av tillförseln av kadmium till reningsverket. Detta innebär att den dominerande källan till kadmium för många avloppsreningsverk finns i maten vi producerar i Sverige eller importerar.

Att upphetta avloppsslammet i en förbrännings- eller pyrolysisprocess innebär ur metallsynpunkt att vissa av metallerna lämnar slammet genom förgasning och fångas in i förbränningsanläggningens luftreningsprocess. De två metaller som lättast förångas är kvicksilver och kadmium, vilket är mycket positivt eftersom de är s.k. utfasningsmetaller som ska bort ur kretsloppet.

4.1.1 OA - Slamspridning på åkermark

Som tidigare nämnts är ett mål med uppströmsarbete att se till att halterna av metaller är så låga i slammet att det inte blir någon långsiktig ackumulering av enskilda metaller i åkermarken när avloppsslam tillförs åkern. Det är helt orealistiskt att sikta på att metallerna skall ner till noll, eftersom en liten mängd metaller alltid har funnits i marken och även finns i maten som vi konsumerar. Det är därför mer realistiskt att fokusera på att närma sig de nivåer av metaller som redan finns i åkermarken, vilket är väl känt.

De metaller som bör fokuseras är de icke-essentiella, d.v.s. de som inte behövs i det organiska kretsloppet och betraktas som föroreningar, t.ex. bly, kvicksilver och kadmium. I detta sammanhang är det intressant att studera den genomsnittliga skillnaden mellan koncentrationer av metaller i slammet och koncentrationer av samma metaller i åkermarken. I Tabell 4 framgår denna skillnad genom kvoten (halt i slam)/(halt i mark) för de metaller som är reglerade enligt svensk lagstiftning (SNFS 1994:2). Om kvoten är 1 så sker ingen nettoackumulering av metaller i marken oavsett hur mycket slam som läggs på.

Även om metallen har en hög kvot så är haltförändringen i marken mycket långsam eftersom massan av slammet bara är en bråkdel av massan av matjordslagret. Eriksson

(2001) skattade antalet år det tar att fördubbla halterna i jord¹ för ett stort antal (61) element, och några exempel är: silver (Ag) 41 år, kvicksilver (Hg) 150 år, koppar (Cu) 170 år, och kadmium (Cd) 480 år.

Tabell 4. Kvot mellan koncentration av metaller i åkermarken och avloppsslam, som regleras enligt svensk lagstiftning. Källor: Åkermark (SLU), slam (SCB och REVAQs årsrapport 2014).

| Metall | Kvot mellan koncentration i slam och åkermark (på basis av torrsvikt) |
|-------------|---|
| Bly | 1,1 (REVAQ 1,0) |
| Kadmium | 3,8 (REVAQ 3,0) |
| Krom | 1,1 |
| Kvicksilver | 12,5 |
| Nickel | 1,2 |
| Koppar | 23 |
| Zink | 10 |

Enligt Tabell 4 skall man således i första hand fokusera på koppar, kvicksilver och kadmium, i nämnd ordning. Det är mycket relevant att arbeta med att få ner halterna av kadmium och kvicksilver i slamm eftersom de är icke-essentiella metaller. Koppar däremot är en essentiell metall, likaså zink, varför det inte är lika angeläget att minska dessa. Om slamspridning skall ske på mycket lång sikt bör dock halterna av dessa också minska. En viktig metall som det inte finns lagstadgade gränsvärden för är silver, men även för silver är det angeläget att halterna minskar.

Det långsiktiga målet för Cd/P-kvoten i slam inom REVAQ är 17 för år 2025, och för närvarande (2016) är det en minoritet som uppnått detta även om de flesta avloppsreningsverk har sjunkande kvoter. Om en åkerjord där matjordslagret innehåller ca 600 g Cd/ha, tillförs ett avloppsslam (full fosforgiva) med t.ex. en Cd/P-kvot på 32, kommer drygt 2 g Cd att tillföras på denna hektar under 10 år fram till år 2025 (REVAQ, 2016). Detta innebär att även om slammets innehåll av kadmium ligger något över det långsiktiga målet för 2025 så är det inga dramatiska mängder som kommer tillföras under denna tid.

Utöver de nämnda metallerna framgår det av REVAQs årsrapport för 2015 (REVAQ, 2016) att metallerna guld, silver, vismut och tenn ackumuleras i en takt som överstiger 0,2 % per år. Av dessa metaller är silver med i förslaget till kommande förordning om slam, och tenn nämns i rapporten i vilken förslaget är publicerat (Naturvårdsverket, 2013).

¹ En 25 cm djup matjord med volymvikten $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$, om man lägger på 0,7 ton TS slam per ha och år. Fördubblingstiderna är baserade på viktade medelhalter av metallerna i slam, samt medelhalter i jord.

4.1.2 0B - Tillverkning av anläggningsjord

Om man tillverkar anläggningsjord av slammet är det inte lika viktigt att minska metallhalterna, men det är ändå bra att minska metallhalterna generellt eftersom anläggningsjorden används i samhället.

I detta systemalternativ tillföres fosfor till åkermark med mineralgödsel. Då man i Sverige framförallt använder mineralgödsel av finskt ursprung, med i genomsnitt 6,5 mg Cd/kg P för 2014/15 (SCB, 2016), så är Cd/P-kvoten lägre än vid slamspridning. Sett i ett globalt perspektiv används emellertid mineralgödsel med betydligt högre Cd/P-kvoter. Detta illustreras av EU-kommissionens förslag att 46 mg Cd/kg P ska vara krav för CE-märkning av gödselmedel år 2030 (KEMI, 2016), efter succesiva nedtrappningar till 137 och därefter 92 mg Cd/kg P.

4.1.3 1A - AshDec

Den information som finns om metallavskiljning vid förbränning är begränsad, men från AshDec-processen rapporteras om 99 % avskiljning för kadmium, kvicksilver och bly. För koppar och zink är avskiljningen runt 90 % (Tyréns, 2013). Outotec har utvecklat en andra generation av processen, p.g.a. att den första generationens fosforprodukt inte hade tillräckligt bra egenskaper för lantbruket. I den andra generationens process tillsätter man en annan kemikalie i processen, vilket resulterar i en något lägre avskiljning av vissa metaller, men ger en bättre fosforförening för lantbruket.

4.1.4 1B - Ash2@Phos

Ash2®Phos -processen har också höga avskiljningsgrader för metaller eftersom den föregås av en slamförbränning. Processen innebär inte en andra uppvärmning av askan (som i AshDec-processen) utan man löser upp askan i kemikalier och får ut en fosforprodukt med Cd/P-kvot på ca 1.

4.1.5 1C - EcoPhos

I EcoPhos-processen avskiljs metaller i en jonbytesenhet med saltsyra efter att askan lösts upp i fosforsyra. Cd/P-kvoten i den slutgiltiga fosforprodukten kan nå under 10. Restprodukten blir en lösning av tungmetallklorider.

4.1.6 2 - Pyrolysis





Enligt tidigare utförda försök så förändras metallinnehållet kraftigt då det torkade avloppsslammet pyrolyseras (Nordin, 2015). Följande metaller minskar: Cd, Pb, Hg, Ag och Zn, samt Ni under vissa förutsättningar. Variation i temperatur och tillsatser av t.ex. en kloridkälla påverkar avgången för de nämnda metallerna. För att få god avgång av metaller bör temperaturen ligga på minst 850 °C. Mängden Cu och Cr påverkades inte alls, och eftersom mängden återstående material är mindre efter pyrolysen så ökar dessa två metallers koncentration i biokolet jämfört med det torkade slammet. Beträffande Cd kan man utan svårighet uppnå Cd/P-kvoter på ca 2 mg Cd/kg P, vilket är mycket bättre än vad som kan uppnås i de flesta mineralgödsel (utan Cd-rening). Även för Hg uppnåddes mycket låga halter i biokolet.

Pyrolysförsöken beskrivna ovan utfördes både i laboratorie- och pilotskala. Metallreduktionen undersöktes i båda dessa fall och visade kraftig reduktion samt framförallt god överensstämmelse mellan laboratorie- och pilotskala.

4.1.7 Jämförelse av systemalternativen

Summering av tungmetallflödena visar att förbränning och pyrolys har mycket god avskiljning av de i detta sammanhang viktigaste metallerna. Alternativen med direkt slamavvändning på åkermark och jordtillverkning avskiljer inga metaller så där måste man förlita sig på uppströmsarbete. Alternativ OB innebär mineralgödselanvändning vilket i Sverige betyder lägre Cd/P-kvot än slamavvändning (alternativ OA).

Betygsättning 'Flöden av tungmetaller till fosforprodukt':

| Alt OA | Alt OB | Alt 1 | Alt 2 |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |

* Symbolen för 'Alt OB' har gjorts mindre för att indikera att det inte är en slamprodukt som avses, utan mineralgödsel.

4.2 Energibehov och klimatpåverkan

Energibehov och klimatpåverkan jämfördes för de olika alternativen inom systemgränserna definierade i kapitel '3. Systemalternativ'.

4.2.1 OA - Slamspridning på åkermark

Spridning av slam direkt på åkermark kräver mindre långväga transporter än mineralgödsel, men däremot transport av större massa, eftersom fosforinnehållet i slam bara är cirka 3 % mätt på torrsubstans, och knappt 1 % i transporttillstånd, d.v.s. avvattnat. Tabell 5 visar energibehov och utsläpp av CO₂-ekvivalenter som uppstår för detta alternativ.

Tabell 5. Energibehov och utsläpp av klimatpåverkande gaser för att transportera och sprida 1 kg fosfor på åkermarken i form av avvattnat avloppsslam.

| | Energibehov (MJ) | CO ₂ -ekv, kg |
|-------------------------------------|------------------|--------------------------|
| Hygienisering | 0 | 6,5 |
| Transport från platta till åkermark | 1,4 | 0,1 |
| Spridning på åkermark | 4,7 | 0,34 |
| Summa | 6,1 | 6,9 |
| Fastläggning av kol | | -22 |

Det första steget är hygienisering, vilket innebär att slammet långtidslagras på platta i 6 månader. Under denna tid uppstår vissa metanemissioner. Klimatpåverkan från lagring av slam har nyligen undersökts och redovisats av Jönsson m.fl. (2015). I rapporten uppskattas emissionerna från slam till 54 kg CO₂-ekv/m³, år. Den lagringstiden är alltså längre än 6 månader men å andra sidan så antar författarna att värdet är kraftigt underskattat eftersom metanemissionerna i början av mätperioden var utanför mätområdet på mätutrustningen.

Transporten från platta vid avloppsreningsverk antas vara 30 km och total mängden som transporteras är ca 100 kg för att återföra 1 kg P. Spridningen på åkermark är mer

energi krävande per hektar än för spridning av mineralgödsel, som är torrt och lätt. Enligt tidigare projekt (von Bahr, 2016) så går det åt ungefär dubbelt så mycket diesel vid spridning av slam per hektar, jämfört med mineralgödsel.

Beräkningen av fastläggning av kol har gjorts med data från Powlson m.fl. (2012), som baserat på försök i Storbritannien rapporterade en fastläggning av 180 kg C/(ha*år*ton TS rötat slam). Detta är av samma storleksordning som den fastläggning som beräknats för försök utanför Malmö efter drygt 30 års slamspridning (opublicerade data). Det ska dock understrykas att kunskapsunderlaget för att bedöma fastläggningen på riktigt lång sikt (> 100 år) inte finns. Sannolikt är kolföreningarna i rötat slam inte lika inerta som i biokol (Alt 2 - Pyrolys).

4.2.2 OB – Tillverkning av anläggningsjord

Eftersom avloppsslammet används till anläggningsjord måste den fosfor som inte återförs tillföras på annat sätt, sannolikt genom tillförsel av mineralgödsel, vilket antas i detta projekt. En beräkning har gjorts över den energimängd och klimatpåverkan som krävs för att producera, transportera och sprida denna fosfor. Beräkningarna baseras på 1 kg fosfor. Förutom produktion av mineralgödsel ingår också långtidslagring (d.v.s. hygienisering) av slammet i 6 månader på samma sätt som i alternativ OA slamspridning på åkermark, och slutligen transport till jordtillverkare. Där samma transportavstånd som i alternativ OA.

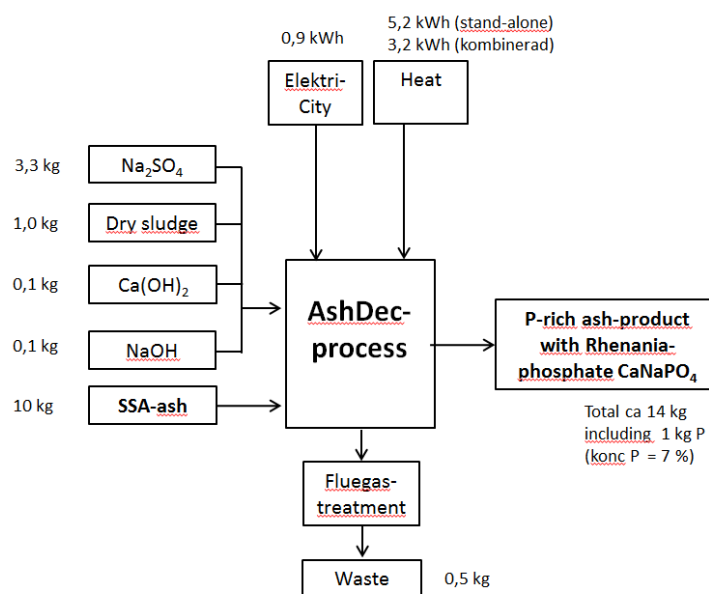
Råfosfaten antas brytas i Sillanjärvi i Finland (enda fosforfyndigheten inom EU) och transporteras med lastbil och båt till Skåne, varefter den sprids med vanlig spridarutrustning. Energibehov och klimatpåverkan för spridningen innebär egentligen att även kväve och kalium kommer att spridas samtidigt med fosfor, men in detta fall är all miljöbelastning från spridningen allokerad till fosfor. Som framgår av Tabell 6 är detta av underordnad betydelse eftersom miljöpåverkan vid spridning är liten jämfört med vid produktion, som utgör den dominerande miljöbelastningen för detta alternativ. Notera att slamlagringen dominerar klimatpåverkan, p.g.a. utsläpp vid lagringen vilket beskrevs i föregående avsnitt.

Tabell 6. Energibehov för att producera, transportera och sprida 1 kg fosfor på åkermarken i form av mineralgödsel. De två översta raderna syftar på slamlagring och transport för jordtillverkningen, och resten av raderna syftar på mineralgödsel-fosfor.

| | Energibehov (MJ) | CO ₂ -ekv (kg) |
|--|------------------|---------------------------|
| Hygienisering/lagring av slam | 0 | 6,5 |
| Slamtransport till jordtillverkare | 1,4 | 0,1 |
| Produktion av P | 35 | 3 |
| Transport av P båt Åbo – Sverige | 1,1 | 0,08 |
| Transport av P lastbil Sillanjärvi - Åbo | 0,7 | 0,05 |
| Spridning på åkermark | 2,4 | 0,17 |
| Summa | 41 | 9,9 |

4.2.3 1A – AshDec

Processen behöver energi i form av naturgas för att hetta upp slamaskan i en roterande ugn (typ cementugn) till ca 950 grader Celsius, elenergi för drift av anläggningen, samt material och energi för att framställa de kemikalier som behöver tillsättas. Ett flödesschema för AshDec-processen med ingående mängder av material och energin som behövs direkt i processen visas i Figur 10. Ingångsmaterialet är slamaska och energibalansen för förbränningen tas från tidigare projekt (se avsnitt '3.2.1 Förbränning av slam').



Figur 10. In- och utflöden för AshDec processen. Värdena är ungefärliga. SSA=Sewage Sludge Ash.

Data från flödesschemat visas även i tabellform i Tabell 7, med några tillägg. De restflöden som processen ger är främst rökgaser som kan ge en viss sotrest vid rökgasrening då produkten i princip är askan plus kemikalier.

Enligt den screening-LCA som gjorts, med fokus på klimatpåverkan (CO₂-ekvivalenter/kg P) består klimatpåverkan nästan uteslutande av påverkan från naturgas och produktion av Na₂SO₄ (knappt 50 % för vardera) (Tabell 8). Miljöbelastningen för själva slamaskan antas vara noll.

Tabell 7. De viktigaste flödena av material och energi i AshDec-processen för att utvinna 1 kg fosfor.

| Ämne/flöde | Mängd | In-/Utflöde |
|---|------------------|---|
| Slam, avvattnat (TS-halt 25 %) | 60 kg | Inflöde |
| Slam, torrt (TS-halt 95 %) | 15 kg | Inflöde |
| Slamaska | 10 kg | Inflöde (torr aska antas ha askhalt 65 %) |
| Slam, torkat | 1,0 kg | Inflöde (ej aska) |
| Ca(OH) ₂ | 0,1 kg | Inflöde |
| NaOH | 0,1 kg | Inflöde |
| Na ₂ SO ₄ | 3,3 kg | Inflöde |
| Naturgas | 5,2 kWh (18 MJ) | Inflöde |
| Elektricitet | 0,9 kWh (3,2 MJ) | Inflöde |
| Avfall (metaller mm) | 0,5 kg | Utflöde |
| Återvunnen P-produkt (kalcinerad aska) | 14 kg | Utflöde av kalcinerad aska med Rhenania- fosfat |
| varav återvunnen P | 1 kg | Utflöde fosfor (delmängd av ovan) |

Tabell 8. Resultat av screening-LCA för AshDec-processen, för att producera 1 kg P. Förbränningssteget ger ett överskott på energi (negativt energibehov) medan det åtgår energi i AshDec-processen.

| | Energibehov (MJ) | CO ₂ -ekv (kg) |
|------------------|------------------|---------------------------|
| Förbränning | -370 | 0* |
| AshDec-processen | 67 | 3,4 |
| Summa | -303 | 3,4 |

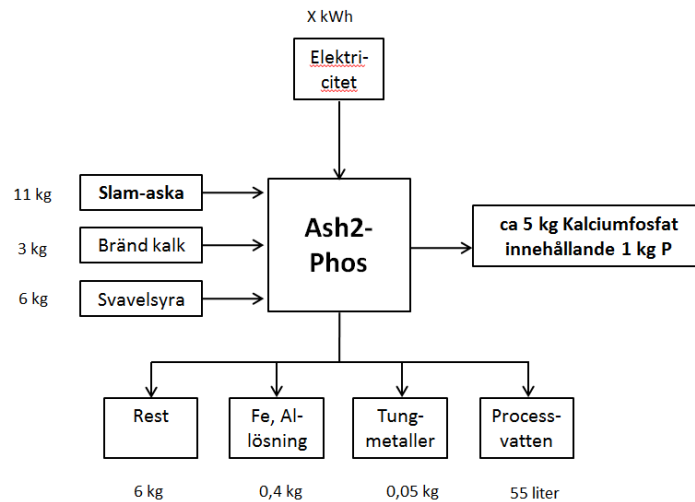
* Slammets kolinnehåll betraktas som av icke-fossilt ursprung, och utsläppet, 19,5 kg CO₂ekv/kg P, räknas inte som klimatpåverkan.

4.2.4 1B - Ash2@Phos

I Ash2Phos-processen framställs alltid kalciumfosfat som en mellanprodukt varefter man väljer väg beroende på vilken slutprodukt som skall framställas. Massbalansen för att producera ca 5 kg kalciumfosfat, vilket innehåller ca 1 kg fosfor, visas i Figur 11.

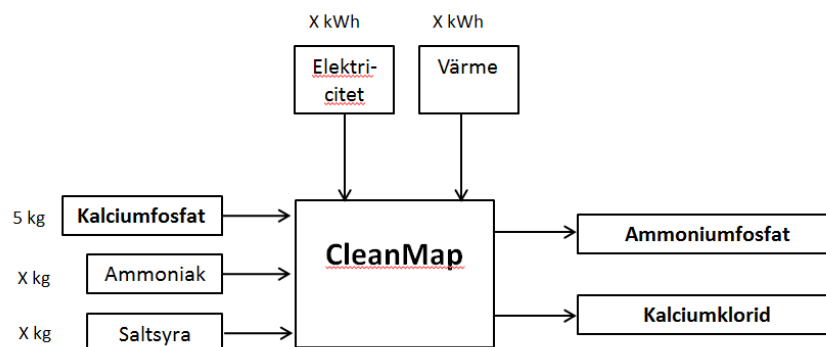
Massbalansen varierar beroende på askans egenskaper såsom upplösningsgrad, vilken fällningskemikalie som använts vid fosforfällningen i reningsverket, och framförallt koncentrationen av fosfor i askan som skall processas. I exemplet i Figur 11 är fosforhalten i askan 9 %. De olika processtegen sker vid rumstemperatur. Urlakningen med syra ger ett restflöde i storleksordning ungefär 50 % av den ursprungliga askan.

Denna rest kan dock ses som ofarlig då den förmodligen mest skulle innehålla kiselföreningar. Restflödet med tungmetaller blir ett mer koncentrerat flöde som kräver särskilt omhändertagande. Ingångsmaterialet är slamaska och energibalansen från förbränningen tas från tidigare projekt (se avsnitt '3.2.1 Förbränning av slam').



Figur 31. Det grundläggande processteget i Ash2Phos, där kalciumfosfat framställs som mellanprodukt. Man har utgått från en monoförbränning med en aska med 9 % fosforhalt vilket är möjligt, men ganska högt. Om askan håller lägre fosforhalt ändras massbalansen. (Källa: Enfält, personlig kommunikation, 2016).

När kalciumfosfat har framställts kan processen fortsätta på olika sätt beroende på vilket slutprodukt man avser framställa. Eftersom det finns ganska många valmöjligheter efter kalciumfosfat redovisas inte alla efterföljande steg, utom ett exempel där man går vidare till ammoniumfosfat och kalciumklorid, genom att tillsätta ammoniak och saltsyra (Figur 12). Inga restflöden uppstår i detta sista steg, utan de ingående kemikalierna blir del av produkterna.



Figur 42. Flödesschema över steget från kalciumfosfat till att framställa ammoniumfosfat.

En screening-LCA har gjorts som fokuserar på klimatpåverkan (CO_2 -ekvivalenter/kg P) och energibehov (MJ/kg P), fram till produktionen av mellanprodukten kalciumfosfat (Tabell 9). I den analysen ingår belastningen från energiproduktion och tillverkning av kemikalier. Hela miljöbelastningen har allokerats till huvudprodukten, eftersom det i

nuläget är osäkert hur bi-produkterna kan användas. Miljöbelastningen för slamaskan antas vara noll.

Någon motsvarande screening-LCA har inte kunnat göras för vidarebehandlingen av kalciumfosfat (Figur 12), eftersom kvantitativa data inte funnits tillgängliga.

Tabell 9. Resultat av screening-LCA för Ash2Phos-processen, för att producera 1 kg P i steget fram till kalciumfosfat. Observera att ytterligare behandling behövs (Figur 12) för att få fram en slutprodukt lämplig för gödning. Förbränningssteget ger ett överskott på energi (negativt energibehov) men det åtgår energi i Ash2Phos-processen.

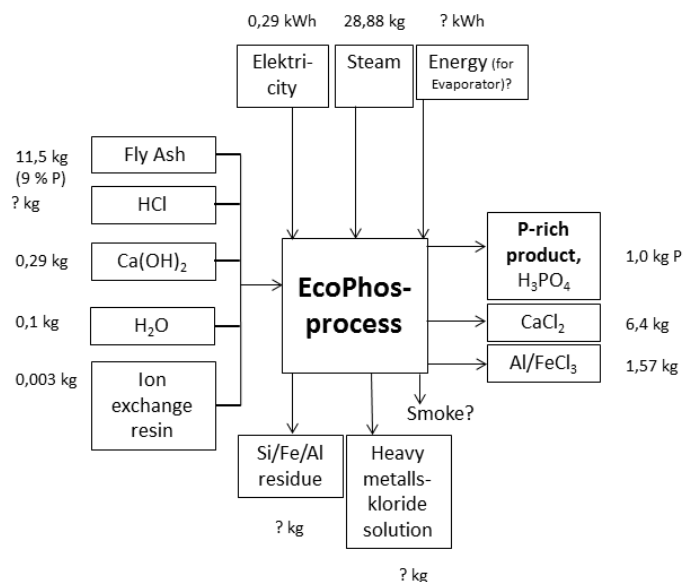
| | Energibehov (MJ) | CO ₂ -ekv (kg) |
|--|------------------|---------------------------|
| Förbränning | -370 | 0* |
| Ash2Phos-processen (fram till kalciumfosfat) | 33 | 4,9 |
| Summa | -337 | 4,9 |

* Slammets kolinnehåll betraktas som av icke-fossilt ursprung, och utsläppet, 19,5 kg CO₂ekv/kg P, räknas inte som klimatpåverkan.

4.2.5 1C – EcoPhos

EcoPhos processen startar även den med en slamaska på samma sätt som i alternativ 1A och 1B. Fosfor lakas ut med en syra. Figur 13 visar ett flödesschema för EcoPhos - processen med in- och utflöden i processen i form av material och energi.

Utlakningen med syra ger ett relativt stort restflöde. Denna rest kan dock ses som ofarlig då den förmodligen mest skulle innehålla kiselföreningar. Restflödet med tungmetaller blir ett mer kompakt flöde som kräver särskilt omhändertagande.



Figur 53. Flödesschema över EcoPhos-processen som bygger på resultat från P-REX (2013). Värdena är ungefärliga och för några flöden saknas mängd (schemat är inte konfirmerat av EcoPhos).

Massbalansen varierar beroende på askans ursprungliga egenskaper, även upplösningsgrad och vilka fällningskemikalier som använts vid fosforfällningen i reningsverket, m.m. Processens olika steg sker vid något förhöjda temperaturer (de Ruiters, personlig kommunikation, 2017).

Eftersom inte tillräckligt kvalitetssäkrade data om processens flöden har erhållits har ingen screening-LCA genomförts.

4.2.6 2 – Pyrolysis

Pyrolysisprocessen innebär att torkat slam upphettas utan syretillförsel vilket medför att en del metaller drivs av med rökgaserna (se avsnitt '4.1.6. 2 - Pyrolysis'). Återstoden är ett biokol som kan användas som ett långtidsverkande fosforgödselmedel. Ett nyligen genomfört Vinnova-projekt 'Slamförädling via pyrolysis' (Nordin, 2015 och von Bahr, 2016) studerade denna process ur både teknisk synpunkt och miljösynpunkt. Det pyrolyserade slammet blir biokol vilket inte ger några restprodukter och rökgaserna förbränns. Endast en liten rökgasreningstest uppstår.

Förändringen i massa för processen beror på att en del av materialet övergår i gasfas och förbränns (Tabell 10). Värmen från pyrolysgaserna räcker med marginal till för värmebehovet för pyrolysisprocessen, men det räcker inte till för att torka slammet. För att säkerställa inert atmosfär under processen tillförs kvävgas som har producerats med hjälp av en eldriven kvävgasgenerator.

Tabell 10. Flöden i pyrolysisprocessen.

| Ämne/flöde | Mängd | In-/Utflöde |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Slam, avvattnat (TS-halt 25 %) | 110 kg | Före processen |
| Slam, torrt (TS-halt 95 %) | 27 kg | Inflöde |
| Kvävgas | 5 m ³ | Inflöde |
| Värme | 0 MJ om pyrolysgaser kan användas | Inflöde |
| Rökgaser, ca | 10 kg | Utflöde |
| Rökgas-restprodukt, ca | 0,01 kg | Utflöde |
| Biokol | 17 kg | Utflöde |
| Återvunnen P | 1 kg | I biokol |

Motsvarande screening-LCA, som för tidigare alternativ, har även gjorts för pyrolysisprocessen. Jämfört med förbränning och P-utvinning ur aska är analysen enklare eftersom inga tillsatskemikalier används. En viktig delprocess är torkningen av slammet. För att torka slam från en TS-halt på ca 25 % till en TS-halt på ca 95 % åtgår ca 2 MJ/kg avvattnat slam (jämför ångbildningsvärme för vatten 2,3 MJ/kg). Ett pågående EU LIFE+ projekt (Johansson, personlig kommunikation, 2016) har demonstrerat en slamtork i demonstrationsskala i Skellefteå med värmeåtervinning genom kondensering av fukten i slammet, som innebär att drygt 1 MJ/kg avvattnat slam går åt, d.v.s. en halvering av ovanstående värde.

Klimatpåverkan för att få fram den värme som behövs beror helt på hur den framställs. Två scenarier visas i Tabell 11. Dels med naturgas som värmekälla, "worst-case", dels med spillvärme som värmekälla, "best-case".

Tabell 11. Resultat av screening-LCA för Biokol-processen, för att producera 1 kg P. Eftersom kol inlagras i marken för biokol antas klimatpåverkan bli fördelaktig (ett minus-värde redovisas). Den lägre siffran för torkenergin gäller för BAT, Best Available Technology, med ett kondenseringssteg.

| | Energibehov (MJ) | CO ₂ -ekv (kg) |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Pyrolysisprocessen | 0,14 | 0 |
| Torkprocessen (naturgas) | 233 | 13 |
| Torkprocessen (BAT med kondensering) | 115 | 0* |
| Fastläggning av kol | | -18 |

*All miljöbelastning allokeras till huvudprodukten om spillvärme används, enligt räkneregler för produkters miljöbelastning, PCR CPC 17 sektion 6.3.4.2. (Källa: Electricity, Steam, and Hot and Cold Water Generation and Distribution, PCR CPC 17 Version 1.1, 2007-10-31).

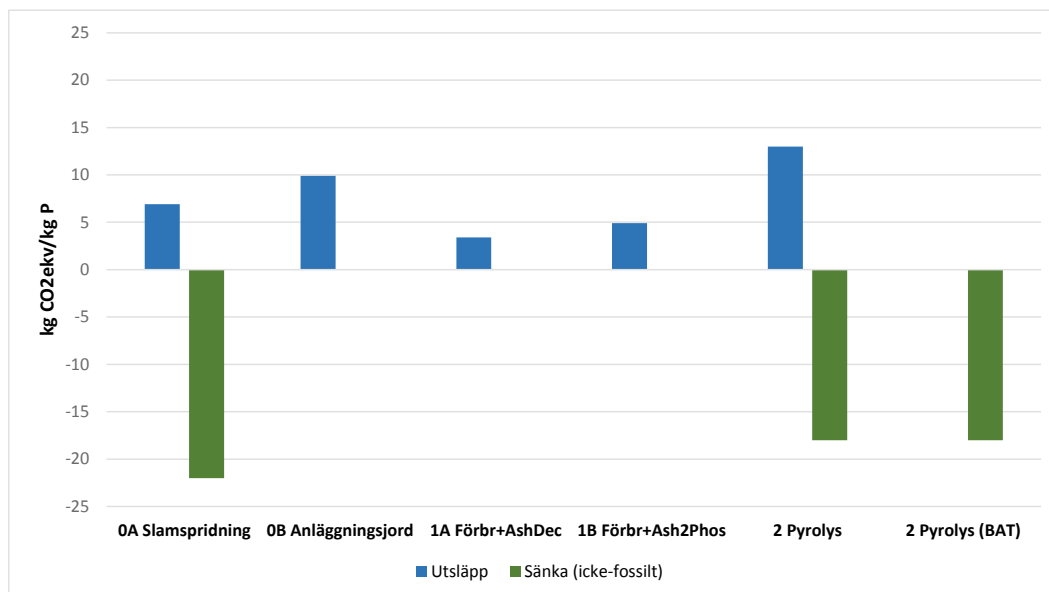
Energibehovet för pyrolysisprocessen består dels av elbehov för apparaturen, dels av elbehov för att framställa kvävgas. Båda dessa är så små och den förstnämnda försummas i sammanhanget, endast det lilla elbehovet för att producera kvävgas kvarstår. För klimatpåverkan från biokolprocessen dominerar inlagringen av kol i marken, övriga bidrag är så små att de kan bortses ifrån.

Summering av klimatpåverkan, oavsett torkprocesser innebär att den blir nära noll även om torkningen sker med naturgas. Ännu bättre är om spillvärme används som värmekälla.

En dags produktion av avvattnat avloppsslam vid VA SYD är 130 ton, vilket ungefär motsvarar 1 ton fosfor om dagen. För att torka denna slammängd krävs ca 234 GJ, vilket är ungefär 1,6 % av Sysavs avfallskraftvärmeverks värmeproduktion under en dag (14600 GJ i genomsnitt per dag år 2015 enligt Sysavs årsrapport). Om Outotecs process för slamtorkning används åtgår hälften av denna värme, d.v.s. knappt 1 %. Ett alternativ är också att koncentrera slamtorkningen till sommartid, då avsättningen för värme är dålig för ett avfallskraftvärmeverk.

4.2.7 Jämförelse av systemalternativen

Klimatpåverkan och energibehov kunde jämföras mellan alternativen genom den screening-LCA som genomförts (Figur 14 och Figur 15). Värdena bör tolkas med försiktighet, eftersom de tekniska processerna inte har nått full tekniskmognad (se avsnitt '4.3. Teknikmognad'). EcoPhos finns inte med på grund av avsaknad av komplett information om processen. För pyrolysalternativet redovisas två alternativ, dels med slamtorkning med naturgas, dels med torkning med Best Available Technology (BAT) då en del av värmen återvinns i ett kondensationssteg.

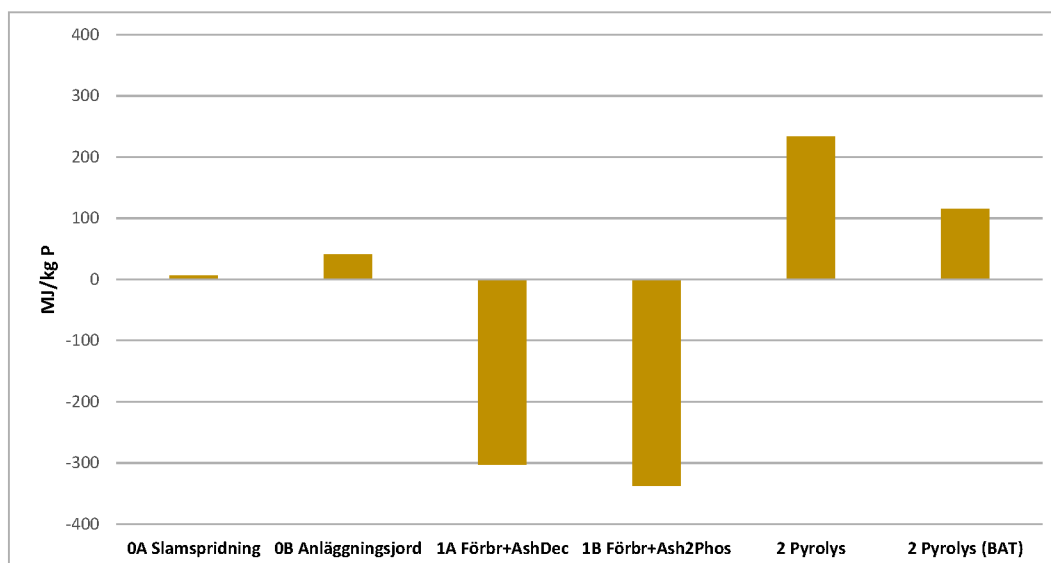


Figur 64. Sammanfattande jämförelse av alternativen med avseende på klimatpåverkan. För slamspridning och anläggningsjord består staplarna nästan enbart av metanutsläpp vid slamlagring.

För slamspridning och anläggningsjord består klimatpåverkan av lagringen av slammet (lika för båda) och dessutom kompenserande tillverkning av mineralgödsel för alternativet med anläggningsjord. För alternativen med förbränning består klimatpåverkan i naturgasanvändning (endast 1A - AshDec) och produktion av tillsatskemikalier.

För slamspridning (0A) och pyrolys (2) utgör marken en kolsänka för en del av slammets innehåll av kol. Storleken av denna sänka i ett längre tidsperspektiv (>100 år) är emellertid mycket osäker. Sannolikt är kolföreningarna i rötat slam inte lika inerta som i biokol, varför det är troligt att pågående forskning kommer visa att den långsiktiga fastläggningen för Alt 0A är mindre än som anges i Figur 14.

I en större kontext är utsläppet av CO₂-ekvivalenter per invånare och år i Sverige ca 4 600 kg (Globalis, 2017), och betydligt större om emissioner från importerade varor medräknas. För hela avloppsreningsprocessen på Ryaverket, är emissionerna ca 56 kg CO₂-ekvivalenter/kg P (brutto, nyttan av biogasproduktion ej medräknat - Gryaab, 2016), vilket innebär att klimatpåverkan från fosforåtervinningsprocesserna i denna studie inte är speciellt dominerande. I en multikriterieanalys skulle klimatpåverkan från fosforutvinning ur slam, med de medtagna alternativen, därför vara av liten tyngd.



Figur 75. Sammanfattande jämförelse av alternativen med avseende på energibehov.

Energibehovet för direkt slamspridning och jordtillverkning är relativt lågt, eftersom det går åt ganska lite energi för transport och spridning. För anläggningsjord så består nästan hela stapeln av energiproduktion för att producera den mineralgödsel som systemet behöver kompenseras med.

Förbränning av slam ger ett överskott på energi, därför redovisas behovet som negativt. Den energi som ändå behövs för processerna i alternativ 1, härrör från naturgasanvändning (AshDec) och energi för att producera kemikalier (både AshDec och Ash2Phos). Pyrolysens höga värden beror på att slammet måste torkas och där avgör teknikval hur högt värdet blir. Högst värde innebär torkning med naturgas och lite lägre värde torkning enligt BAT med ett condensatsteg.

Betygsättning 'Energibehov':

| Alt 0A | Alt 0B | Alt 1 | Alt 2 |
|--------|--------|-------|-------|
| | | | |

* Symbolen för 'Alt 0B' har gjorts mindre för att indikera att det inte huvudsakligen är en slamprodukt som avses, utan mineralgödsel.

Betygsättning 'Klimatpåverkan':

| Alt 0A | Alt 0B | Alt 1 | Alt 2 |
|--------|--------|-------|-------|
| | | | |

4.3 Teknikmognad

För teknik som ännu inte etablerats på marknaden kan mognadsgraden anges med Technology Readiness Level (TRL) (Tabell 12). För alternativen med låg TRL finns mindre data och utförda tester. 0-alternativen som redan används i fullskala har TRL 9.

Tabell 12. Technology Readiness Level 1-9 beskrivna utifrån Europakommissionens definition, samstämd med Vinnovas översättning.

| TRL-nivå | Kännetecken för uppnådd miljö |
|----------|---|
| TRL 1 | Grundläggande principer observerade |
| TRL 2 | Teknikkoncept formulerade |
| TRL 3 | Experimentella bevis på konceptet föreligger |
| TRL 4 | Teknik validerad i laboratoriemiljö |
| TRL 5 | Teknisk validering i relevant miljö |
| TRL 6 | Teknisk demonstration i relevant miljö |
| TRL 7 | Prototyp demonstrerad i driftsmiljö |
| TRL 8 | Komplett och validerat system |
| TRL 9 | Befintlig produkt använd med framgång i driftmiljö (verifierad produktanvändning) |

4.3.1 0A - Slamspridning på åkermark

Alternativet har tillämpats under lång tid och tekniken är helt utvecklad, TRL 9.

4.3.2 0B – Tillverkning av anläggningsjord

Alternativet har tillämpats under lång tid och tekniken är helt utvecklad, TRL 9.

4.3.3 1A – AshDec

Under medverkan i EU-projektet P-REX testades metoden i laboratoriemiljö i Skellefteå men ingen demo-anläggning finns kvar idag, TRL 4.

4.3.4 1B - Ash2@Phos

Metoden har testats i laboratoriemiljö och diskussioner förs om att bygga en fullskaleanläggning i Sverige, TRL4.

4.3.5 1C – EcoPhos

EcoPhos är en patenterad teknologi. Det finns idag ingen aktiv fullskalig process i drift där aska från avloppsslam är råmaterial. Däremot finns en liknande process för utvinning av fosfor från lågkvalitativ fosformineral igång i fullskala i Lima, Peru och på gång i Namibia, Egypten, Indien och Kazachstan. En demonstrationsanläggning där slamaska kan användas som råmaterial finns i Varna, Bulgarien med en kapacitet på extraktion från 0,5-1 ton aska/h, vilket ger en årlig kapacitet på 4 000-8 000 ton. Denna demonstrationsbyggnad är uppbyggd med moduler för att kunna alternera mellan processtegen. Enligt EcoPhos skall en pilotanläggning byggas i en flyttbar container för att möjliggöra ytterligare validerande tester i samband med ett EU-projekt där de medverkar, TRL 7.

4.3.6 2 – Pyrolys

Metoden är validerad i laboriemiljö av SP Sveriges tekniska forskningsinstitut 2015 i projektet "Slamförädling via pyrolys" (Nordin, 2015 och von Bahr, 2016). I samband med samma projekt demonstrerades pyrolys på avloppsslam i pilotskala på en anläggning i Tyskland med lyckat resultat. Den metallreduktion som konstaterades i laboratorieskala kunde verifieras fullständigt i pilotskala. En rimlig bedömning är att TRL-nivån med avseende på enbart pyrolysdelen ligger på ungefär 6. Torkning av slam är en välutvecklad process med TRL-nivå 9.





4.3.7 Jämförelse av systemalternativ

Förbränning och utvinning av fosfor respektive pyrolys har tillämpats i pilotskala och har därmed en del utveckling kvar innan alternativen kan användas i fullskalig drift. Observera att förbränning som metod är en väl utvecklad och har TRL-nivå 9. Vid jämförelse av systemen i Alt 1 tas endast hänsyn till de mindre utvecklade stegen i fosforutvinningsprocesserna (Tabell 13).

Tabell 63. Jämförelse av alternativens teknikmognad utifrån TRL-nivåerna.

| Alternativ | TRL-nivå | Motivering |
|-----------------------|----------|---|
| 0A - Slamspridning | 9 | Tekniken är helt utvecklad. |
| 0B - Jordtillverkning | 9 | Tekniken är helt utvecklad. |
| 1A - AshDec | 4 | Tekniken har testats i laboriemiljö, ingen demoanläggning finns idag. |
| 1B - Ash2Phos | 4 | Tekniken har testats i laboriemiljö, ingen demoanläggning finns idag. |
| 1C - EcoPhos | 7 | Demonstrationsanläggning finns i drift och en mindre mobil pilotanläggning i container är under utveckling. |
| 2 - Pyrolys | 6 | Metoden validerad i laboriemiljö. Demonstrerad i pilotskala på en anläggning i Tyskland. |

Betygsättning 'Teknikmognad':

| Alt 0A | Alt 0B | Alt 1 | Alt 2 |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |

4.4 Fosforprodukternas egenskaper

Med lämpliga egenskaper bör gödselmedlet spridas så att man uppnår:

- Korrekt giva (kg/ha)
- Jämn fördelning över arbetsbredden (variationskoefficient).

Genom att ha kontroll över dessa parametrar kan lantbrukaren åstadkomma ett gott växtnäringsutbyte, vilket är positivt för såväl miljön som lönsamheten.

Jordbruket ställer också höga krav på god hygien och liten miljöbelastning. Lokalt är det lantbrukaren som närmast drabbas vid t.ex. spridning av smittor. Åkermarken är också den viktigaste resursen och förutsättningen för jordbruksproduktion. Eventuella föroreningar från gödselmedel inklusive slam kan innebära att gödselproduktens produkter blir omöjliga att sälja.

4.4.1 *Fysiska och kemiska egenskaper*

Handelsgödsel (konstgödsel, mineralgödsel) har fysikaliska och kemiska egenskaper i stort utformade enligt marknadens önskemål. För att få hög acceptans för användning av P från slam till odling är det viktigt att utforma slutprodukterna så att de håller likvärdig kvalitet. Det betyder att användarperspektivet måste vara i fokus vid utformning av P-gödselmedel från slam, annars lyckas inte återföringen av fosfor till odlingen.

När det gäller de kemiska egenskaperna är utbudet på marknaden av olika kombinationer av växtnäringskoncentrationer stort, så utvunnet P ur slam bör kunna kombineras med andra makronäringsämnen för att komponera gödselmedel lämpliga för olika grödor och markförhållanden. Koncentrationen ska vara hög för att begränsa massan att hantera vid transport, lagring och spridning. Fosfor måste vara lättillgänglig för grödan dvs. inte så starkt bundet att det är svårt för växten att ta upp det. Vissa processtekniker kan påverka fosfors växttillgänglighet.

När det gäller fysikaliska egenskaper så styr det valet av teknik vid transport, lagring och spridning. Vid framtagning av nya typer av gödselmedel är det angeläget att dessa har fysikaliska egenskaper som möjliggör god precision med de maskintyper som finns på marknaden. De fysikaliska egenskaper som har störst inverkan på spridningsresultatet när det gäller giva och spridningsjämnhet är:

- Kornstorleksfördelning
- Volymvikt
- Flödes hastighet
- Hållfasthet

4.4.2 *Växttillgänglighet*

Viktigt är att växtnäringsämnen är i lättillgänglig form för växterna och att det går att hantera gödselprodukten med tillgänglig teknik för handelsgödsel. Det måste också finnas rekommendationer rörande dosering för att uppnå optimala skördenivåer för olika grödor. Rekommendationerna är baserade dels på markens fosforklass, dels på odlad gröda (Jordbruksverket, 2015). Växterna tar upp vattenlösligt fosfor och i ögonblicksperspektivet finns det endast 0,01 procent av markens fosfor löst i markvattnet som fosfatjoner (Linderholm, 2011). Istället finns största delen av fosfor i mer svårtillgänglig form, varav ca hälften är i organisk form. När fosforstatusen i marken är god, levererar jorden fosfor till markvätskan. Vid gödsling av "marken" behöver inte fosfor vara vattenlös eftersom den med tiden blir lättillgänglig. Men vid låga fosforhalter i marken, måste bortförd fosfor kompenseras med mer snabblös fosfor

för att inte avkastningen ska sjunka (Linderholm, 2011) och då behövs gödsling med lättillgänglig (vattenlöslig) fosfor.

För att kunna recirkulera fosfor till åkermarken är det viktigt att fosfor förekommer i en form som direkt kan användas i jordbruket eller eventuellt skulle kunna användas av mineralgödselindustrin som då skulle kunna sälja fosforprodukter med återvunnen fosfor på liknande sätt som många andra branscher har börjat med de senaste åren. Återvunna fibrer från papper har funnits länge och på senare tid har även en del skor, väskor m.m. börjat innehålla en viss andel återvunnet material. T.ex. skulle mineralgödsel företag kunna sälja fosforgödselmedel innehållande X % återvunnen fosfor.

Vattenlöslig fosfor kan tas upp direkt av grödorna. I gödselmedlet Superfosfat är t.ex. 95 procent av totalfosfor vattenlöslig och förekommer som kalciumdivätefosfat, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. De senaste åren har de olika metoderna för återvinning och extraktion av fosfor framställt en lång rad olika fosforföreningar med olika värde beroende på sammanhang (Tabell 14). Bedömningen av dessa föreningar är mycket olika i de källor som studerats. Värdet av respektive fosforprodukt beror av behovet för enskild åkermark och gröda.

Olika källor hävdar att några av föreningarna i princip är oanvändbara som fosforgödselmedel, t ex framhålls att aluminium- och järnfosfat inte är växttillgängligt, trots att fosfor i kemiskt fällt slam förekommer i denna form och att slam används framgångsrikt som fosforgödselmedel i jordbruket.

Tabell 74. Vanligt förekommande fosforföreningar inom återvunnen fosfor.

| <i>Namn</i> | <i>Formel</i> | <i>Kommentar</i> |
|-----------------|------------------------------|--|
| Fosforsyra | H_3PO_4 | Råvara för produktion av ammoniumfosfat. |
| Kalciumfosfat | $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ | Råvara för att producera fosforsyra. |
| Struvit | NH_4MgPO_4 | En fosforförening som återvinns inne i ARV med biologisk fosforfällning. |
| Natriumfosfat | NaH_2PO_4 | |
| Ammoniumfosfat | $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ | Ett av världens vanligaste fosforgödselmedel. |
| Aluminiumfosfat | AlPO_4 | Förekommer i slam om Al har använts som fällningskemikalie. |
| Magnesiumfosfat | MgHPO_4 | |
| Järnfosfat | FePO_4 | Förekommer i slam om Fe har använts som fällningskemikalie. |

Tabell 15 visar slutprodukterna från de processer som studerats i projektet. För askprocesserna kan slutprodukten variera beroende på hur processen utformas. Ingen

bedömning av de olika alternativens slutprodukter har gjorts och hur väl lämpade de är som gödselmedel.

Tabell 85. Fosforföreningar inom återvunnen fosfor som förekommer i detta projekt. Ingen bedömning av användbarhet har gjorts.





| Alternativ | Namn | Kommentar |
|------------|---|---|
| 1A | Rhenania-fosfat | AshDec ger denna fosforprodukt |
| 1B | Mono-/dikalciumpfosfat, mono-/diammoniumfosfat, fosforsyra, superfosfat | I Ash2Phos-processen kan slutprodukten alterneras |
| 1C | Fosforsyra | EcoPhos ger denna fosforprodukt |
| 2 | Biokol | Används främst för långtidsgödsling av åkermarken ur fosforsynpunkt |

4.4.3 Jämförelse av systemalternativen

Alternativet OB innebär användning av handelsgödsel som fosforgödselmedel då slammet går till jordstillverkning. Handelsgödsel har önskvärda egenskaper som hög koncentration av näringsämnen, bra hanteringsegenskaper och det finns med många olika näringskoncentrationer för olika grödor och jordar. En nackdel är dock att det inte innehåller något organiskt kol.

Spridning av slam, alt. OA, innebär att fosfor och andra näringsämnen tillförs åkern dock inte lika balanserat som i alt. OB. I alt. OA tillförs även kol men spridningen är resurskrävande eftersom koncentrationerna av fosfor och andra näringsämnen är låga. I alternativen med förbränning Alt 1 genereras en fosforprodukt utan övriga makronäringsämnen. För att kunna använda jordbrukets vanliga konstgödselspridare måste fosforprodukterna i alt. 1 först anpassas efter de krav som ställs. Vid alternativet med pyrolys (alt. 2), har slutprodukten liknande egenskaper som alt. 1, men med fördelen att förutom fosfor även kol tillförs åkermarken. Slutprodukten blir ett biokol. Det är oklart hur växttillgänglig fosfor i biokolet är, vilket kan klargöras med fältförsök.

Betygsättning 'Fosforprodukternas egenskaper':

| Alt OA | Alt OB | Alt 1 | Alt 2 |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |

* Symbolen för 'Alt OB' har gjorts mindre för att indikera att det inte är en slamprodukt som avses, utan mineralgödsel.

5 Diskussion

I denna rapport saknas genomgripande analyser av några hållbarhetskriterier: Risk för spridning och smitta, flöden av mikroföroreningar, ekonomi, teknisk robusthet och socio-kulturella aspekter. Nedan följer en kortare genomgång av alternativen i förhållande till dessa kriterier.

Anledningen till att 'Risk för spridning av smitta' inte har analyserats särskilt djupt är att alternativ som bygger på förbränning/pyrolys bedöms klara hygieniseringen utan problem, eftersom processerna innebär höga temperaturer under tillräckligt lång tid. Förslaget till kommande slamförordning innebär generellt att kraven för hygienisering skärps, samt att en hygienisering skall ske oavsett vad man avser använda avloppsslammet till. Detta innebär att om man uppfyller kommande lagkrav, vilket förutsätts, så kommer också en fullgod hygienisering att tillämpas.

Angående 'Flöden av mikroföroreningar', d.v.s. läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara organiska ämnen så är det väl känt att oönskade organiska föroreningar förekommer i slam i olika utsträckning. Frågan är vilken skada de gör, vilket medför att det är intressant att studera vad som händer med dessa ämnen i de olika alternativen.

I en rapport från september 2016, undersöktes förekomst och nedbrytning av läkemedelsrester från avloppsslam (Magnér m.fl., 2016). Författarna studerade 24 olika vanliga läkemedel och deras förekomst i slam och jordbruksmark. De läkemedel som förs till avloppsreningsverket återfinns efter rening antingen i vattenfasen och slamfasen. Det är läkemedlets egenskaper som avgör var det hamnar. 15 av dessa 24 undersökta läkemedel kunde återfinnas i avloppsslammet. Även den jord som tidigare slamgödslats undersöktes på samma sätt och då återfanns 4 st. av dessa 24 läkemedel i detekterbara halter. Rapportens slutsats var att de studerade läkemedlen tenderade att fastläggas i jord och med tiden brytas ner på plats.

De senast åren har problemet med mikroplaster uppmärksamrats, inte minst genom att plasten kan vara bärare av andra föroreningar. För närvarande är forskningsfokus på att utreda källor och hur dessa mikroplaster kan påverka åkermarken och recipienten för det renade avloppsvattnet. Mer forskning behövs på området.

Vad gäller alternativen med förbränning eller pyrolys så kan man konstatera att de termiska processerna är ett bra sätt att bryta ner mikroföroreningar, med tanke på att temperaturen är hög, ca 800 – 1000 grader C, och lång uppehållstid. I AshDec-processen räknar man med en uppehållstid på 20 minuter, vilket är längre än i de flesta förbränningsanläggningar. Även pyrolysisprocessen har en uppehållstid som med god marginal hinner bryta ner mikroföroreningarna.

Mineralgödselanvändning innebär att inga mikroföroreningar leds till åkermark. I alternativet med slam och anläggningsjord finns de till största delen kvar, även om viss nedbrytning kommer att ske på sikt. I förbrännings- och pyrolys-alternativen däremot bryts de organiska mikroföroreningarna ner på ett effektivt sätt.

Angående 'Ekonomi' så ingår inte några kostnadsberäkningar rapporten, men erfarenhetsmässigt så är användning av slam på jordbruksmark eller jordtillverkning likvärdigt ur kostnadssynpunkt (detta då gödselvärdet är lågt än så länge). Övriga alternativ innebär ökade kostnader till följd av processer för förbränning/pyrolys,

fosforutvinning, rökgasrening etc. Dessa kostnader kommer att vara möjliga att bedöma när alternativen når en högre teknikmognadsnivå. Samma gäller hållbarhetskriterierna 'Teknisk Robusthet' och 'Organisation och institutionella aspekter' som bland annat handlar om alternativens kringsystem såsom t.ex. insatskemikalier, rökgasrening och behov av kompetenser för drift och underhåll.

Vad gäller brukaraspekter så kan allmänheten förväntas vara positiva till kretslopp men också vara kritiska till användning av restprodukter från avloppshantering som gödselmedel dels för att det kan skapa en oro att oönskade ämnen följer med till jordbruk, dels för att det finns en "äckelfaktor" att mänsklig avföring används. I förbrännings- och pyrolysalternativen är fördelen att de innebär kretslopp samtidigt som det är "processade" produkter för fosforåterföring som används i jordbruket.

Det är svårt att avgöra i nuläget huruvida ett utav alternativen ur ett systemperspektiv är den mest hållbara systemlösningen för att återföra fosfor till åkermark, då metoderna fortfarande är under utveckling. En för-kommersiell upphandling skulle vara en möjlig väg att gå för att ta fram en lämplig lösning i en innovativ process ihop med leverantörerna. För mer information, se Vinnovas handbok om förkommersiell upphandling (Vinnova, 2013).

För att implementera en fullskalig process för fosforutvinning från avloppsslam blir en viktig aspekt att utvärdera om avloppsslammet, eller om det är aska, är avfall och när det annars upphör att vara avfall. Att få återvinna avfall är en anmälnings- eller tillståndspliktig verksamhet enligt 29 kap. miljöprövningsförordningen 2013:251. Som det ser ut idag för att skapa en cirkulär ekonomi där återvunna material sätts tillbaka på marknaden, finns två alternativ. Antingen säljs/används det återvunna materialet som avfall eller så "produktifieras" avfallet. Avfallslagstiftningen (samt miljöbalken) gäller i det förstnämnda fallet och produkt-/kemikalielagstiftningen gäller i det andra, det finns ingen gråzon.

Avfall kan upphöra att vara avfall om det genomgår en återvinningsprocess t.ex. genom att tillämpa s.k. "End of Waste"-kriterier framtagna gemensamt i EU-kommissionen eller genom en enskild bedömning (Naturvårdsverket, 2016). I vissa fall kan det räcka med enkla provtagningar för att bevisa att avfallet har motsvarande egenskaper som andra produkter på marknaden medan i andra fall då flera återvinningssteg med komplicerade processer finns med, blir bedömningen mer komplex. Avloppsslam är i utgångsläget ett avfall enligt Ragn-Sells, ägaren av Ash2Phos-processen.

Den europeiska kemikaliemyndigheten konstaterar att det behövs klargöras "*huruvida återvinning är en fortsättning på användningen av det ursprungliga registrerade ämnet och, om så är fallet, därefter huruvida det är tillverkning som omvandlar avfall till att återigen utgöra ett eller flera ämnen som sådana i blandningen eller i en vara*" (Europeiska kemikaliemyndigheten, 2010). De är tydliga med att "*återvinning inte, under några omständigheter och per definition, är användning*". Alltså när ett ämne upphör att vara avfall och ska återvinnas startas en ny livscykel. De anger att flygaska uppfyller definitionen för tillverkning av produkt eller utvinning av ämnen i naturlig form, de skriver: "*I artikel 3.8 i Reach-förordningen definieras tillverkning som "produktion eller utvinning av ämnen i naturlig form"*". Ämnen som har genomgått en kemisk modifiering under avfalls- och återvinningsprocessen (t.ex. vissa slag såsom stålslagg som vittrar,

flygaska, bildning av metan under råmaterialåtervinning av polymerer) uppfyller helt klart denna definition (Europeiska kemikaliemyndigheten, 2010).





















6 Slutsatser

I Tabell 16 sammanfattas för- och nackdelar med respektive process samt några kvarstående frågor. I Tabell 17 redovisas sen en sammanfattning av betygsättningen med avseende på hållbarhetkriterierna.

Tabell 96. Sammanfattning av fördelar och nackdelar för studiens systemalternativ 1 och 2, samt vilka frågor som fortfarande kvarstår.

| Systemalternativ | Fördelar | Nackdelar | Kvarstående frågor |
|------------------|---|--|--|
| 1A - AshDec | God metallavskiljning Små restflöden | Höga temperaturer vid behandling | Hur bra fungerar Rhenania-fosfat som gödningsmedel? Hur skall uppskalning och demonstration i driftmiljö ske? |
| 1B - Ash2Phos | Tungmetallerna koncentrerade i en liten restprodukt | Kräver föregående förbränning. Betydande mängd restprodukter då fällning sker med tillsats av syra. | Hur skall uppskalning och demonstration i driftmiljö ske? |
| 1C - EcoPhos | God metallavskiljning | Kräver föregående förbränning. Betydande mängd restprodukter då fällning sker med tillsats av syra. | Hur ser de kvantitativa materialflödena i processen ut? |
| 2 - Pyrolys | God metallavskiljning (ej för Cu och Cr) Små restflöden Liten energitillförsel vid pyrolysisprocessen | Energikrävande torkning måste föregå pyrolysen | Hur bra fungerar biokol som fosforgödningsmedel med avseende på tillgänglighet för grödorna? |

Tabell 107. Alla systemalternativen utvärderades efter uppsatta hållbarhetskriterier som i denna tabell redovisas i jämförelse med '0A - Slamspridning på åkermark'.

| Hållbarhetskriterier | Systemalternativ | | | |
|---|---|---|--|---|
| | 0A Slamspridning på åkermark | 0B Tillverkning av anläggningsjord | 1 Utvinning av P efter förbränning | 2 Produktion av biokol genom pyrolys |
| Flöden av tungmetaller till fosforprodukt |  |  |  |  |
| Energibehov |  |  |  |  |
| Klimatpåverkan |  |  |  |  |
| Teknikmognad |  |  |  |  |
| Fosforprodukternas egenskaper |  |  |  |  |

* Symbolen för 'Alt 0B' har gjorts mindre för att indikera att det inte är en slamprodukt som avses, utan mineralgödsel.

7 Fortsatt arbete

Detta förprojekt har belyst olika möjliga alternativ för framtida hantering av fosfor i slam för västra Skåne. Flera av de utvalda alternativen befinner sig på en ganska låg teknikmognadsnivå och fler aktiviteter behövs för att dessa alternativ ska bli fullt ut bedömningsbara. I det pågående projektet 'Återvinning av slam till produkter', där bl.a. författarna till denna rapport kommer att ingå i projektgruppen, kommer stöd för några av alternativen i denna studie ges för marknadsintroduktion och användning i jordbruk. Detta kommer att innebära att alternativen får en högre mognadsnivå och med större säkerhet kan vara med i bedömningen för en framtida storskalig lösning för västra Skåne.

Nedan följer tre ytterligare områden som identifierats som viktiga steg i processen för att välja inriktning för västra Skåne:

- Studier av alternativ för att fånga fosfor i vattenbehandlingsdelen av avloppsreningsverket (t.ex. struvitutfällning). Detta för att få en komplett bild av vilka alternativ som finns tillgängliga för att recirkulera fosfor.
- Tester i laboratorie- och pilotskala. Testerna skulle bland annat gälla slamhantering, förbränning, pyrolys och fosforutvinning, men också odlingsförsök med utvunna produkter. Vi har funnit att det finns ett behov av en svensk eller nordisk testbädd som kan försörja aktörer inom denna sektor eftersom det är många VA-bolag idag som vill skapa en reservplan om inte slamspridning på åkermark längre blir gångbart.
- VA SYD och NSVA behöver vidare ta fram fler beslutstöd inför val av inriktning. Ett sådant beslutstöd är en komplett hållbarhetsanalys innehållande alla viktiga hållbarhetsaspekter, t ex ekonomi och socio-kulturella aspekter som inte kunnat bedömas i denna studie.

8 Referenser

8.1 Tryckta och elektroniska källor

Avfall Sverige, 2014. *Bränslekvalitet sammansättning och egenskaper för avfallsbränsle och energiåtervinning*. Rapport E2014:01. Tillgänglig:

www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/E2014-01.pdf.

Bäfver, L., Renström, C., Fahlström, J., Enfält, P., Skoglund, N. och Holmén, E., 2013. *Slambränsleblandningar- Förbränning och fosforutvinning*. Waste Refinery, WR-59.

Cirkulation, 2017. *Tyskt krav på återvinning av fosfor ur slam*. Tillgänglig:

www.cirkulation.se/artiklar-och-notiser/tyskt-krav-paa-aatervinning-av-fosfor-ur-slam.

EcoPhos hemsida, <http://www.ecophos.com/#/en/ecological/>, hämtad: 2017-02-10.

Eriksson, J., 2001. Halter av 61 spårelement i avloppsslam, stallgödsel, handelsgödsel, nederbörd samt i jord och gröda. Rapport 5148, Naturvårdsverket.

Europeiska kemikaliemyndigheten, 2010. *Vägledning om avfall och återvunna ämnen*, kapitel 2.2.1. Hittas på European Chemicals Agency, "<http://echa.europa.eu/>" https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/waste_recovered_sv.pdf, hämtad: 2017-02-01.

Eurostat, 2012. *Sewage sludge disposal from urban wastewater treatment, by type of treatment, 2009*. Tillgänglig: [ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment,_by_type_of_treatment,_2009_\(1\)_\(%25_of_total_mass\).png&oldid=110863](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment,_by_type_of_treatment,_2009_(1)_(%25_of_total_mass).png&oldid=110863).

Globalis, 2017. Tillgänglig: [www.globalis.se/Statistik/CO2-utslaepp-per-inv/\(language\)/swe-SE](http://www.globalis.se/Statistik/CO2-utslaepp-per-inv/(language)/swe-SE).

Gryaab, 2016. *Miljörapport Ryaverket 2015*. Gryaab rapport 2016:1.

Jordbruksverket, 2015. *Riktlinjer för gödsling och kalkning 2016*. Jordbruksinformation 19 - 2015. Jordbruksverket, Jönköping.

Jönsson, H., Junestedt, C., Willén, A., Yang, J., Tjus, K., Baresel, C., Rodhe, L., Trela, J., Pell, M. och Andersson, S., 2015. *Minska utsläpp av växthusgaser från rening av avlopp och hantering av avloppsslam*. Rapport 2015-02. Svenskt Vatten Utveckling.

KEMI (Kemikalieinspektionen), 2016. Remissvar om förslag till Europaparlamentets och rådets förordning COM(2016) 157 om fastställande av bestämmelser om tillhandahållande på marknaden av CE-märkta gödselprodukter och om ändring av förordning (EG) nr 1069/2009 och (EG) nr 1107/2009. Tillgänglig: www.kemi.se/global/om-kemikalieinspektionen/remissvar/2016/160516-kemikalieinspektionens-remissvar-om-forslag-till-ny-godsmedelsforordning_webb.pdf.

Linderholm, K., 2011. *Fosfor och dess växttillgänglighet i slam – en litteraturstudie*. Rapport Nr 2011-16, Svenskt Vatten Utveckling, Stockholm.

Magnér, J., Rosenqvist, L., Rahmberg, M., Graae, L., Eliaeson, K., Örtlund, L., Fång, J., och Brorström-Lundén, E., 2016. *Fate of pharmaceutical residues - in sewage treatment and on farmland fertilized with sludge*, IVL-rapport B2264, September 2016.

Naturvårdsverket, 2013. *Hållbar återföring av fosfor – Naturvårdsverkets redovisning av ett uppdrag från regeringen*. Rapport 6580. Tillgänglig:

www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6580-5.pdf?pid=9620.

Naturvårdsverket, 2016. *Vägledning om när avfall upphör att vara avfall*. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledningar/Avfall/Lagar-och-regler-om-avfall/Nar-avfall-upphor-att-vara-avfall>.

Naturvårdsverket & SCB, 2016. *Utsläpp till vatten och slamproduktion 2014 - Kommunala reningsverk, massa- och pappersindustri samt viss övrig industri*. Statistiska meddelanden MI 22 SM 1601. Tillgänglig:

www.scb.se/Statistik/MI/MI0106/2014A01/MI0106_2014A01_SM_MI22SM1601.pdf.

Nordin, A., 2015. *Heavy Metal Removal from Sewage Sludge by Pyrolysis Treatment*, Master Thesis in Resource Recovery, nr 3/2015, University of Borås.

Powelson, D.S., Bhogal, A., Chambers, B.J., Coleman, K., Macdonald, A.J., Goulding, K.W.T. och Whitmore, A.P., 2012. *The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: A case study*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 146:23-33.

P-REX, 2013. *P-REX*. Tillgänglig: p-rex.eu.

Ramböll, 2015a. *Etablering av slamförbränning, förundersökning*. Uppdrag utfört för VA SYD och NSVA.

Ramböll, 2015b. *Återvinning av fosfor från slamaska*. Uppdrag utfört för VA SYD och NSVA.

REVAQ, 2015. *Frågan som världen glömde - En rapport om fosfor*. Meddelande M140. Tillgänglig:

www.old.svensktvatten.se/Documents/Kategorier/Avlopp%20och%20milj%C3%B6/REVAQ/fosfor_%20final.pdf.

REVAQ, 2016. *Årsrapport 2015*. Tillgänglig: www.svensktvatten.se/globalassets/avlopp-och-miljo/uppstromsarbete-och-kretslopp/revaq-certifiering/revaq-arsrapport-2015.pdf.

SCB, 2016. *Försäljning av mineralgödsel för jord- och trädgårdsbruk under 2014/15*. Statistiska meddelanden MI 30 SM 1601. Tillgänglig:

www.scb.se/Statistik/MI/MI1002/2014B15/MI1002_2014B15_SM_MI30SM1601.pdf.

SimaPro, 2016. *SimaPro*. Tillgänglig: www.simapro.co.uk.

Strömberg, B. och Herstad Svärd, S., 2012. *Bränslehandboken*. Värmeforsk Serviceaktiebolag. Tillgänglig:

<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/sokmotor/Rapport1234.pdf>.

Svebio, 2014. *Bioenergihandboken*. Tillgänglig:

<http://www.novator.se/bioenergy/facts/fuelinvest.pdf>.

Theilin, G., 2014. *Production of a nutrient-rich biochar from a residual material*. Patent application WO 2014189433.

Tyréns, 2013. *Behandlingsmetoder för hållbar återvinning av fosfor ur avlopp och avfall*. Slutrapport 2013-02-15, Naturvårdsverkets uppdrag nr 246295.

von Bahr, B., 2016. *Miljösystemanalys av Ekobalans process för pyrolys av slam*, SP-rapport 2016:61. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Vinnova, 2013. *Förkommersiell upphandling, en handbok för att genomföra FoU-upphandlingar*. Serienr. VR 2013:09.

8.2 Personlig kommunikation

Blomberg, Kristina., Yara, 2016.

De Ruiten, Rob, RBC² Consultancy (talesperson för EcoPhos), 2017.

Enfält, Patrik, EasyMining AB, 2016.

Johansson, Robert, Outotec Sverige, 2016.