EXAMENSARBETE INOM KEMITEKNIK, GRUNDNIVÅ
STOCKHOLM, 2015

Fosforåtervinning ur förbränningsaska från rötslam och rötrest

Martin Jonsson

Fortum Värme

2015

EXAMENSARBETE

Högskoleingenjörsexamen

Kemiteknik

Titel:	Fosforåtervinning ur förbränningsaska från rötslam och rötrest
Engelsk titel:	Phosphorus recycling from digested sewage sludge ash and digestate ash from municipal food waste
Sökord:	Fosforåtervinning, rötslam, rötrest, avloppsslam, tungmetaller, våtkemisk, termokemisk, kadmium, jordbruk, regelverk, ASH DEC-, CleanMAP-, PASH-, SEPHOS-, SESAL-Phos-, BioCon-processen
Arbetsplats:	AB Fortum Värme, Stockholm

Handledare

Fortum Värme: Eva-Katrin Lindman

Handledare KTH: Ingemar Jerling

Student: Martin Jonsson

Sammanfattning

Fosfor är ett ändligt näringsämne som på senare tid uppmärksammats i samband med övergödning och bristen som råvara. Näringsämnet är livsviktigt för likväl människor som djur och växter och de brytbara fosforreserverna börjar ta slut. Det gäller att i framtiden applicera hållbara fosforåtervinningsmetoder för att ta tillvara på mängden fosfor som finns i omlopp. Avloppsslam är ett avfall som växer till storleken och med befolkningsmängden. Rötat avloppsslam tillsammans med andra avfall i form av rötrester innehåller nyttiga näringsämnen så som fosfor, kväve och kalium men också onyttiga spårämnen, patogena ämnen, organiska rester och tungmetaller. Rötslam innehåller även läkemedelsrester och mikroplaster.

I dagens läge är det tillåtet att sprida rötslam och rötrest på åkermark för att återföra fosfor tillsammans med andra näringsämnen till jordbruket. Kommande regelverk innebär skärpta lagkrav på rötslammet som måste genomgå någon form av förbehandling innan innehållet får användas som en resurs. Ett alternativ är att vidta strängare krav på hygienisering utav slammet. Det kan ske med pastörisering, termofil rötning eller annan behandling vid högre temperaturer. Ett annat, mer lovande alternativ är förbränning av rötslam och rötrest. Vid förbränning destrueras en stor mängd av oönskade ämnen så som läkemedelsrester, patogena ämnen och kvarblivet organiskt material. Beroende på i vilken panntyp förbränning sker, CFB-, BFB-panna eller rosterpanna kvarblir en askfraktion som botten- och flygaska. I askfraktionerna finns fosfor och till stora delar tungmetaller kvar. Fosforn är relativt inert vid temperaturförändringarna medan lättflyktiga tungmetaller evaporerar och ansamlas till störst del i flygaskan.

Rapporten utvärderar ett antal olika fosforåtervinningsmetoder som kan indelas i två huvudkategorier, termo- och våtkemiska återvinningsmetoder. Syftet är att beskriva de olika metoder samt uppskatta dess kostnader, kommersiell mognad samt ange för- respektive nackdelar för metoderna ur ett hållbart perspektiv. Till de termokemiska metoderna tillhör termisk behandling av avloppsslam i en BFB-panna och ASH DEC-processen. Den förra är under utveckling och befinner sig på labb/bänk-skala. Den termokemiska behandlingsmetoden i BFB-panna är en dekontamineringsprocess där askan kan spridas direkt på åkermark då fosforn befinner sig i form av växttillgängligt *whitlockit* i bottenaskan. Systemet beräknas ha en investeringskostnad på 72 Mkr, med en pay-back tid på 4,4 år och kapacitet på minst 1000 ton aska/år. ASH DEC-processen är också en termokemisk dekontamineringsprocess där produkten utvinns i form av natriumkalciumfosfater. Metoden uppskattas ha en investeringskostnad på 140-170 Mkr, återbetalningstid på ca 4 år för en kapacitet på ca 30 000 ton aska/år. I investeringskostnaden ingår en roterugn Processen är kommersiell och anläggningar finns i Tyskland och Österrike.

De våtkemiska fosforåtervinningsmetoderna innefattar CleanMAP-technology, PASH-Processen, SEPHOS-processen, SESAL-phos processen och BioCon-Processen. Gemensamt för dessa processer är att olika laknings- och upplösningstekniker används samt att ett processvatten bildas och måste genomgå vattenrening. CleanMAP-technology är en lovande våtkemisk process under utveckling. Pågående förprojektering ska innefatta en anläggning med kapacitet upp till 30 000 ton aska/år, vilket motsvarar ett omhändertagande på ca 30 % av Sveriges idag producerade avloppsslam. CleanMAP ger en klassificerad produkt i form av 100 % rent ammoniumfosfat som kan användas direkt som gödningsmedel och är vattenlösligt. Processen anses enligt EasyMining Sweden AB vara energieffektiv med låga driftkostnader, god tungmetall reduktion och enkel att implementera i en

befintlig anläggning. Tekniken är under utveckling och eftersom ingen anläggning byggts finns inga investerings- eller driftskostnader publicerade.

PASH-processen är en lakningsmetod som bildar kalciumfosfat som slutgiltig produkt. Processen ger en reduktion av tungmetaller och andra metaller, specifikt aluminium. Processen är därför lämplig att använda på avloppsslam där reningsverk använt aluminium som fällningskemikalie. PASH-processen beräknas ha en investeringskostnad på ca 46 Mkr, driftkostnad på 37 Mkr vid en kapacitet på 30 000 ton aska/år och en fosforåtervinning på ca 1 700 ton/år.

SEPHOS-processen använder syra och bas för upplösnings av aska. Fosfor återvinns som aluminiumfosfat som sedan genomgår ett mer avancerat steg (Advanced SEPHOS-process), i syfte att slutligen erhålla kalciumfosfater som är mer växttillgängligt då aluminium kan orsaka skada på växternas rötter. SEPHOS-processen är under utveckling och det finns inga investerings- eller driftkostnader att tillgå.

SESAL-Phos processen är en flerstegsprocess med upplösning av aska med syra och bas för att bilda växttillgängligt kalciumfosfat som produkt. Processen är under utveckling och information om investerings- och driftkostnader finns inte att tillgå.

BioCon-Processen är baserad på en jonbytesteknik för att separera oönskade metaller och oorganiska element för att erhålla fosforsyra. Processen är omfattande och kräver en mängd olika tillsatskemikalier. Processen används i Danmark vid en förbränningsanläggning och implementerades i Sverige under tidigt 2000-tal men anläggningen har lagts ned vid på grund av driftproblem.

De metoderna som är mest lovande för Fortum Värme att vidare granska, sett till de för och nackdelar som erhållits, är CleanMAP-technology, ASH DEC-processen och termisk behandling i BFB-panna. CleanMAP-teknologin innefattar driftkostnader i form av hög kemikalieförbrukning, och kräver mindre anläggningsyta än ASH DEC-processen. ASH DEC-processen är kommersialiserad i Tyskland och Österrike och har drifterfarenhet av anläggningen, vilket är en god anledning till implementering i Sverige. Termisk behandling i BFB-panna har potential att fungera både praktiskt och ekonomiskt. Trots att denna process är långt ifrån kommersiell, kan den i framtiden vara en god kandidat att implementera för fosforåtervinning.

Kvaliteten på erhållet rötslam och rötrest bör ha en låg ask- och fukthalt vilket ger en bättre förbränning. Biobränsle har en låg askhalt men hög fukthalt. Samförbränning av rötslam och rötrest tillsammans med biobränsle är att föredra rent ekonomiskt eftersom investering i en mono-förbränningsanläggning enbart för slam kan undvikas. En nackdel är dock att koncentrationen av fosfor i askan blir lägre och kostnaden för fosforåtervinning ökar. Fukthalten på biobränslet bör vara så lågt som möjligt, dels för att uppnå en tillräcklig koncentration av fosfor, dels för att erhålla ett rimligt värmevärde på bränsleblandningen vid förbränning.

Huruvida förbränning av rötslam eller strängare krav på hygienisering av avloppsslam är ett tillvägagångssätt för behandling är i dagens läge en pågående diskussion. I ett initialt skede är ett alternativ att förbränna mindre mängder av rötslammet i de fall tungmetallhalterna, särskilt kadmium, är för höga för att spridas på åkermark.

Ur ett hållbart perspektiv är det lämpligt att se förbränning och efterföljande fosforutvinning ur aska som ett gott alternativ till behandling av ett, till mängden, växande avfall. Både den sociala- och

miljömässiga aspekten behandlas då avfallsvolymer reduceras, läkemedelsrester, smittoämnen och andra patogena ämnen destrueras samtidigt som tungmetaller reduceras och fosfor återvinns. Ur ett ekonomiskt perspektiv är kostnaderna för att återvinna fosfor i dagsläget för höga i jämförelse med vad det kostar att bryta råfosfater. Det kostar ca 28-38kr/kg för framtagning av återvunnen fosfor, beroende på vilken metod som används. Försäljningspriset för fosfor är ca 3 kr/kg.

Tillsvidare gäller det att utveckla och effektivisera fosforåtervinningsmetoderna så att driftproblem kan minimeras samt investerings- och driftkostnader kan reduceras vilket medför större attraktion för företag att investera i återvinningsmetoderna.

Abstract

Phosphorus is an endless nutrient that lately has been drawing much attention in correlation to over-fertilization and as a scarce commodity. Phosphorus is essential to all life, humans, animals and plants and the workable phosphorus back-ups seems to be running out. It is therefore important in the future to apply sustainable phosphorus recovery methods to take care of the circulation of phosphorus in today's society. Sewage sludge is a waste that grows with the increase of population. Digested sewage sludge among other wastes such as digested municipal food waste contain beneficial nutrients such as phosphorus, nitrogen and potassium but also unhealthy trace elements, pathogenies, heavy metals and unwanted organic material. Sewage sludge also contain drug residues and micro plastic fibers.

As of today it is allowed to spread sewage sludge and digested municipal food waste on farm land to return phosphorus together with other nutrients. Future set of regulations will probably be subtilized which will influence the usage of sewage sludge spreading on farm land. The sewage sludge will most likely have to go through some kind of pretreatment before being used as a resource. An alternative is to institute harder demands on hygenization which can be performed by pasteurization, thermophilic digestion or other treatments involving an increase in temperature to get rid of harmful substances. Another alternative that seems more promising is combustion of sewage sludge and digested municipal food waste, which will destroy unwanted substances such as drug residues, pathogenies, and left-over organic material. Depending in which type of pan the combustion will take place, CFB- (Circulated fluidized bed), BFB- (Bubbling fluidized bed) or grate boiler it will leave different amount of bottom ash and fly ash. Phosphorus and larger amount of heavy metals will be concentrated in the ash. Phosphorus is inert to the temperature changes and finds itself contained in the bottom ash, meanwhile heavy metals evaporate and stack up in the fly ash.

This report evaluate different kinds of phosphorus recovering methods that can be divided in to main categories, thermo chemical and wet chemical recovery methods. The main purpose is to describe the methods, estimate its cost, find out if the method is ready for commercial use and specify the advantages and disadvantages. Thermo chemical treatment of sewage sludge ash in a BFB and the ASH DEC-process is two thermo chemical treatment methods this report brings up. The first mentioned is under development and its main purpose is to decontaminate the ash and use phosphorus rich whitlockite ash as a fertilizer. The system has an evaluated investment cost of 72 MSEK, with a pay-back time of 4,4 years and a capacity of at least 1000 ton ash/year. The ASH DEC-process is also a decontaminating process where the product is reclaimed as sodium calcium phosphates. The method estimated investment cost is around 140-170 MSEK with a pay-back time of 4 years and a capacity of 30 000 ton ash/year. The ASH DEC-process is currently in use in Germany and Austria.

Among the wet chemical phosphorus recovery methods presented in this report is, CleanMAP-technology, PASH-Process, SEPHOS-Process, SESAL-Phos process and the BioCon-process. In common for these process is the different leaching and dissolution techniques and the origin of a process water that has to be cleaned before released. CleanMAP-Technology from EasyMining Sweden AB is much promising currently under development. The layout design will encapsulate a capacity of 30 000 ton ash/year, which correspond to the apprehending of nearly 30 % of the produced sewage sludge in Sweden today. CleanMAP-technology gives a water soluble product, ammonium phosphate, with nearly 100 % purity and can be used directly on farm lands. The process is energy

efficient with low operating costs and a propitious heavy metal reduction. The technique is under development with no demonstration and no public data of investment costs or operating costs available.

The PASH-process is an acid leaching method and form calcium phosphate as final product. The process gives a reduction of heavy metals and other metals, aluminum in specific. The process is therefore most appropriate to use on sewage sludge from water treatment plants that uses aluminum as a precipitate chemical. The investment cost is estimated to around 46 MSEK with an operating cost of 37 MSEK and a capacity of 30 000 ton ash/year and a phosphorus recovery of 1 700 ton/year.

The SEPHOS-process uses acid and base for the dissolution of ash. Phosphorus is recovered as aluminum phosphate that ultimately is passed through a more advanced step called “advanced SEHPOS-process” in purpose to obtain calcium phosphates which are more suitable for plants because aluminum can cause damaged to the roots. The SEPHOS-process is currently under development and there are no public released data on investment costs or operating costs.

The SESAL-Phos process is a multi-stage process with dissolution of ash with acid and base to obtain calcium phosphate as final product. The process is currently under development.

The BioCon-process is based on ion exchange technology to be able to separate unwanted metals and inorganic elements. The obtain product is mainly phosphorus acid. The process is comprised and has a large variety of chemical demand. The process is used in Denmark and was implemented in Sweden in early 21th century but had to close down due to operating problems.

Phosphorus recovery methods that seems most promising for Fortum Värme, accordingly to the advantages and disadvantages is CleanMAP-technology, ASH DEC-process and in the future thermo chemical treatment of sewage sludge ash in a BFB-boiler. CleanMAP-technology can implicate high operating costs due to the addition of chemicals, but they will be part of the products and the facility will be smaller than the ASH DEC-process. The ASH DEC-process is a commercial process in use in both Germany and Austria and has knowledge of operating which will be one of the reasons to consider implementation in Sweden. Thermo chemical treatment in a BFB-boiler has potential both practical and economical to be considered for implementation in the future even though it’s far from a commercial use.

The quality of digested sewage sludge and digested municipal food waste should have a low ash- and moisture content. Bio fuel contain low ash content but high moisture content. Co-combustion of digested sewage sludge and municipal food waste along with bio fuel is to prefer in an economically point of view because no further investment in a mono-combustion plant is needed for the sludge only. One disadvantage is that the concentration of phosphorus in the ash will be lower and the cost of phosphorus recovery will increase. An appropriate moisture content of the bio fuel should be as low as possible to obtain higher phosphorus concentration in the ash and to get a tolerable heat value in the fuel mix during combustion.

Whether combustion of digested sewage or more severe demands on hygenization of sewage sludge is the wanted procedure for treatment is today an ongoing discussion. Initially, one alternative is to

burn small amounts of digested sewage sludge in those cases heavy metal content is too high to be spread on farm lands, especially cadmium.

In a sustainable perspective it would be appropriate to see combustion followed by phosphorus recovery methods from ash as a good option of treatment. Both the social- and environmental aspect is attended when the volume of waste is decreased, drug residues destroyed, infectious agents and other pathogenic substances destroyed meanwhile heavy metals is concentrated and gathered for safe depositing. In an economical point of view it is confirmed that the costs to recover phosphorus is today too high in comparison to workable resources. Today the cost of recovered phosphorus is around 28-38 SEK/kg, depending on which method used and the selling price is around 3 SEK/kg, which makes it non profitable.

For the time being the phosphorus recovery methods need further attention to be able to develop and expand upon. The need is also to make them more effective and to learn how to encounter operating failures and minimize the investment- and operating costs. If so, the recovery methods will bring more attention to companies and make them more interested in investment.

Innehåll

1. Inledning 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Problemformulering 2
1.3 Syfte 2
1.4 Mål 3
1.5 Lösningsmetoder 3
1.6 Metodbeskrivning 3
1.7 Avgränsningar 3
1.8 Målgrupp 4
2. Nuvarande avsättning för avloppsslam och rötrest 4
2.1 Avloppsslam 4
2.2 Rötrest 5
3. Regelverk idag och imorgon 6
3.1 Förordningar gällande spridning av avloppsslam 7
3.1.1 Revaq-Certifierat Rötslam 7
3.2 Förordningar gällande Rötrest 8
3.2.1 Certifierad rötrest/biogödsel SPCR 120 9
3.3 Hållbar återföring av fosfor 9
3.3.1 Miljömålssystemet om fosforåterföring 10
4. Material och metoder 10
4.1 Potential till förbränning i Sverige 10
4.2 Tillgången på rötslam och rötrest 11
4.2.1 Förbränning av rötslam och rötrest 11
4.2.2 Samförbränning med Biobränsle 11
4.3 Askans sammansättning 13
5. EU-projekt: P-Rex & RecoPhos 13
6. Metoder för fosforutvinning ur aska 14
7. Termokemiska fosforåtervinningsmetoder 15
7.1 Termisk behandling av avloppsslam i BFB-panna från LTU/UmU 15
7.1.1 Processbeskrivning 15
7.1.2 Tidigare erfarenheter 17
7.1.3 För- respektive nackdelar 17
7.1.4 Kostnader 18
7.2 ASH-DEC Processen 19
7.2.1 Processbeskrivning 19
7.2.2 Tidigare erfarenheter 21
7.2.3 För- respektive nackdelar 22
7.2.4 Kostnader 23
8. Våtkemiska fosforåtervinningsmetoder 23

8.1 CleanMAP-Technology 24
8.1.1 Processbeskrivning 24
8.1.2 Tidigare erfarenheter 26
8.1.3 För- och nackdelar med processen 27
8.1.4 Kostnader 28
8.2 PASH-processen 28
8.2.1 Processbeskrivning 28
8.2.2 Tidigare erfarenheter 29
8.2.3 För- och nackdelar 30
8.2.4 Kostnader 30
8.3 SEPHOS-processen 30
8.3.1 Processbeskrivning 30
8.3.2 Tidigare erfarenheter 32
8.3.3 För- och nackdelar 32
8.3.4 Kostnader 32
8.4 SESAL-Phos Processen 32
8.4.1 Processbeskrivning 32
8.4.2 För- och nackdelar 34
8.4.3 Kostnader 35
8.5 BioCon-Processen 35
8.5.1 Processbeskrivning 35
8.5.2 Tidigare erfarenheter 36
8.5.3 För- och nackdelar 36
8.5.4 Kostnader 37
8.6 Fosforutvinningsmetoder under utveckling 37
8.6.1 MEPHREC-Processen 37
8.6.2 RecoPhos 37
8.6.3 Bioleaching 38
8.6.4 Elektrodialytisk process 38
8.6.5 LeachPhos 38
9. Kostnader för fosforutvinning 39
9.1 Kemikaliekostnader 39
9.1.1 Produktutfall från fosforåtervinning 39
9.2 Transportkostnader 40
10. Miljövinster, risker och förluster 40
10.1 EU:s avfallshierarki 41
11. Resultat 41
12. Diskussion 43
13. Slutsats 45
Bibliography 1
Bilaga 1. Kostnadsexempel över fosforåtervinning i termokemiskbehandling av avloppsslam i en BFB-panna i

Tekniska termer

ISSA – Incinerated sewage sludge ash

SSA – Sewage sludge ash

MSW – Municipal solid waste

RT-flis – Returträflis

WWTP – Waste Water Treatment Plants

BFB – Bubblande fluidiserad bädd

CFB – Cirkulerande fluidiserad bädd

DS – Dried substance

TS – Torr substans

Grot – Biobränsle, grenar och toppar

Rötrest – Rötat matavfall, stallgödsel, grönmassa, skörderester, övrigt organiskt material som rötats i rötkammare

Rötslam – Rötat avsloppsslam. Avloppsslammet har passerat en termofil hygiensieringsprocess.

Eluent – En tillsatt vätska till en stationär fas

Eluat – En vätskeextraktion separerad från den stationära fasen

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Fosfor är ett ändligt makronäringsämne som utgör en livsviktig resurs för människan, djur och livsmedelsförsörjningen. Tillgångarna på fosfor är kraftigt reducerade då resurserna världen över minskar.

I dag konsumeras ca 20 miljoner ton fosfat/år i världen. Fosfortillgångarna utgörs till ca 90 % av sedimentära bergarter där kadmiuminnehållet är ca 100 mg/kg fosfor. Fosfor finns dessutom i vulkaniska bergarter där kadmiuminnehållet > 10mg/kg fosfor (Svenskt Vatten, 2013). Efterfrågan på fosfor och andra mineralgödsel kommer att öka i takt med att planeten blir allt mer befolkad. Fosfor till jordbruksproduktionen beräknas behöva öka med 70 % under de kommande 30 åren för att tillgodose produktionstakten. (Finnson, M140, 2015). EU har ett stort importberoende av fosfor eftersom tillgången till brytbar fosfor domineras av USA, Kina och Marocko. USA och Kina beräknas ha 40-50 år kvar av brytbara reserver (Finnson, M140, 2015), vilket gör att Marocko kommer stå kvar som ensam storproducent och kan därför styra marknadspriserna. I takt med att befolkningen ökar beräknas den totala fosforreserven hålla i ca 170 år. Redan efter 50 år kan en markant skillnad på tillgången av brytbar fosfor märkas. (Finnson, M140, 2015).

Ett sätt att ta tillvara på den fosfor som finns i omlopp idag är att utvinna och återvinna den ur rötslam och rötrest innehållandes höga halter av fosfor. Kommunalt avloppsslam är ett avfall som innehåller stora mängder fosfor och har ett varierat användningsområde. Ett användningsområde för rötslam och rötrest är spridning på åkermark för att tillgodose jordbruket med fosfor och andra näringsämnen.

Rötslam och rötrest innehåller en stor volym av andra substrat, exempelvis organiskt material, i förhållande till mängden fosfor vilket gör att koncentrationen näringsämne är relativt låg. Dessutom innehåller rötslam läkemedelsrester, hormonstörande ämnen och toxiska föreningar samt tungmetaller. Rötrest innehåller tungmetaller och kan innehålla toxiska ämnen och annat oönskat organiskt material. Vissa tungmetaller är skadliga för människan, växter och djur och kräver en viss reglering för att förhindra spridning av dessa. Kadmium kan orsaka Bl.a. benskörhet och njurproblem hos människan och är en tungmetall som behöver bortföras från mineralgödselindustrin. Nordiska länder, framförallt Sverige arbetar med att minimera kadmiumtillförseln till åkermark och producera gödselmedel från kadmiumfattig fosforråvara. (Svenskt Vatten, 2013).

I framtiden kommer regelverket för slamspridning att skärpas, samtidigt som behovet av att återföra fosfor till produktiv mark öka. Förbränning av rötslam och rötrest är ett alternativ. Vid förbränning destrueras läkemedelsrester, hormonstörande ämnen och toxiska föreningar och större mängden tungmetaller förgasas vid temperaturer kring 1000 ^{O}C. De förgasade tungmetallerna kan separeras och avskiljas från processen. Fosfor påverkas inte av den höga förbränningstemperaturen och erhålls i koncentrerad form i askan. (Finnson, M140, 2015).

I Europa förbränns ca 25 % av allt rötslam vilket generar aska innehållande ca 60 000 ton P/år. I Sverige används årligen 10 000 – 12 000 ton P/år inom lantbruket (Patrik Enfält, 2014). Askan som

blir kvar efter förbränning är inte helt fri från tungmetaller och kan deponeras eller genomgå ytterligare behandling för utvinning av fosfor och avskiljning av tungmetaller. (Baresel, o.a., 2014)

För att uppnå en hållbar återföring av fosfor till samhället krävs det fosforutvinning- och fosforåtervinningsmetoder. Ett gott alternativ är att utvinna fosfor ur förbränningsaskan eftersom regelverk och förordningar i framtiden kommer ställa större krav på slammet som sprids på åkermark. Kan fosforutvinning ur förbränningsaska från rötslam och rötrest erhållas ur ett hållbart perspektiv innebär det att en livsviktig resurs återvinns samtidigt som avfallsvolymer reduceras och skadliga ämnen destrueras. (Finnson, M140, 2015)

Fosforåtervinningstekniker finns både som termokemiska- och våtkemiska metoder. I de termokemiska metoderna förgasas tungmetallerna vid förbränning och kvar erhålls botten- och flygaska innehållandes fosfor. I de våtkemiska metoderna löses förbränningsaska upp med syror och baser följt av urlakningstekniker och kemisk fällning. Här kan tungmetaller och oupplöst substrat separeras samtidigt som fosfor kan fällas ut till bl.a. kalcium- och ammoniumfosfater.

Återvinningsmetoderna skulle vara ett gott bidragande till naturvårdsverkets förslag på etappmål, att år 2018 erhålla en återföringsgrad på 40 % fosfor till produktiv mark. (Baresel, o.a., 2014)

1.2 Problemformulering

AB Fortum Värme är samägt med Stockholm stad, ingår i den finländska Fortumkoncernen. Fortum Värme producerar el, värme och kyla som levereras till kunder i Stockholm. Värme och elproduktion sker i kraftvärmeanläggningar med bl. a. avfall och biobränsle. Fortumkoncernen finns i Sverige, Finland, Baltiska staterna, Polen och Ryssland.

Fortum Värme har intresse att undersöka möjligheten att förbränna rötslam och rötrest i Stockholm med störst fokus på rötslam och i ett tidigt stadium undersöka om fosforåtervinningsmetoder är lämpligt att implementera i befintliga anläggningar.

Intresset för återvinning av fosfor har under 2000-talet ökat markant. Idag finns ett fåtal kommersiella fosforåtervinningsmetoder från förbränningsaska, men området är under ständig utveckling. Återvinningsmetoderna som presenteras i rapporten är termo- och våtkemiska metoder som innefattar olika komplexitet men med samma målinriktning, att återvinna fosfor.

Kostnaden för återvinningsmetoderna är i dagsläget höga i jämförelse med produktionen av brytbar fosfor och är idag inte konkurrenskraftiga. Men eftersom fosfor i framtiden kommer att bli en bristvara kommer också priset på brytbar fosfor att öka vilket medför en bättre lönsamhet för implementering av fosforåtervinning.

1.3 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka vilka metoder som är tillgängliga för att avskilja fosfor och återvinna det ur askan från förbränning av rötslam och rötrester ur ett tekniskt, ekonomiskt och miljömässigt perspektiv.

Arbetet innebär att:

- Jämföra för- respektive nackdelar, sammanställa fosforåtervinningsmetoderna och se om metoderna går att utveckla eller är kommersiellt genomförbara för Fortum Värme
- Undersöka möjligheten att implementera kombinerade metoder för borttagning av tungmetaller samtidigt som återvinning av fosfor och andra ändliga näringsämnen sker
- Undersöka gällande och kommande regelverk för slamhantering
- Undersöka och klargöra lämplig fosforåtervinningsmetod för Fortum Värme

1.4 Mål

Arbetet ska ha utrett vilka metoder som är lämpliga för Fortum Värme vad det gäller fosforåtervinning vid förbränning av rötrest och rötslam. Målet är även att ur ett hållbart perspektiv ha tagit reda på om förbränning av rötrest och rötslam är lämpligt med tanke på gällande och kommande regelverk.

Nedan presenteras de mål som är uppsatta för arbetet:

- Funnit kommersiellt genomförbara återvinningsmetoder för Fortum Värme
- Undersökt möjligheten för kombination av metoderna. Att återvinna fosfor samtidigt som en reduktion av tungmetaller sker.
- Avgjort vilken panntyp som passar förbränningen, CFB eller Rosterpanna.
- Avgjort vilken förbränningstyp som ger högst verkningsgrad, samförbränning eller mono-förbränning, med avseende på substratets värmevärde och fukthalt.

1.5 Lösningsmetoder

De lösningsmetoder som arbetet innefattar är:

- En grundläggande litteraturstudie i befintliga publicerade rapporter angående fosfor-utvinning-/återvinningsmetoder
- Dragna slutsatser för vilka metoder som passar Fortum Värme
- Utvärderat vilka åtgärder som bör vidtas inom området för förbränningsaska och fosfor-utvinning-/återvinningsmetoder

Rapporten kommer att ligga till grund för ett fortsatt arbete för Fortum Värme att i framtiden ha tillgång till en utvärdering av lovande fosfor- utvinning-/återvinningsmetoder.

1.6 Metodbeskrivning

Förutsättningarna för att arbetet ska fortskrida enligt uppsatt syfte och mål gäller det att information gällande arbetet hämtats från lämpliga platser för att utöka kunskapsområdet kring ämnet. Information hämtas från rapporter, litteraturer, kunskap från lärare på KTH eller kunnig personal på Fortum Värme.

1.7 Avgränsningar

Rapporten är en grundläggande litteraturstudie och avgränsar sig till att studera olika tillgängliga metoder för fosforåtervinningsmetoder. Arbetet begränsas till att undersöka fosfor-utvinning/återvinning ur förbränningsaska från avloppsslam och rötrest. Inget laborativt arbete utförs.

1.8 Målgrupp

Rapporten riktar sig främst till Fortum Värme och högskole-/civilingenjörer inom liknande studieområden samt till övriga företagsintressenter.

2. Nuvarande avsättning för avloppsslam och rötrest

I följande kapitel beskrivs avsättningen för avloppsslam och rötrest i dagsläget, vilka mängder som produceras i Sverige, med inriktning på Stockholm, samt vilka mängder de finns att tillgå för Fortum Värme.

2.1 Avloppsslam

Avloppsslam är ett oundvikligt avfall som genereras vid vattenreningsprocesser. I slammet absorberas till stor del biologiskt svårnedbrytbara fettlösliga, bioackumulerande organiska ämnen men också viktiga näringsämnen så som kväve, fosfor och kalium. Avsättningen för avloppsslam varierar, men behovet att återföra näringsämnen till jordbruket ökar. (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012)

Enligt den slamstrategi som Stockholm Vatten framtagit år 2013 ska avloppsslammet präglas av (Stockholm Vatten, 2013):

- Hög tillförlitlighet, med god ekonomi
- Minsta möjliga påverkan på omgivande miljö
- Uppfylla nationella miljömål och övriga lagar och regler

Slamstrategin innefattar slam från Stockholm Vattens avloppsreningsverk. För att slamstrategin ska uppfyllas krävs det metoder som nyttiggör växtnäring i slam, ersätter naturresurser, exempelvis morän och matjord. Även metoder som möjliggör energiutvinning. (Stockholm Vatten, 2013)

I Sverige produceras årligen ca 240 000 ton (TS) avloppsslam i reningsverken innehållandes 6000 ton fosfor och 9000 ton kväve tillsammans med annat substrat. Ungefär 95 % av ingående fosfor hamnar i avloppsslammet (Linda Bäfver, 2013). Användningen av mineralgödsel i svenskt jordbruk uppnår fosfor- och kvävemängder på 8000 respektive 160 000 ton. (SLU, o.a., 2013). Vid reningsverk med rötningsprocesser uppgår slammängden till 20 kg TS/ansluten person. Saknar reningsverket möjlighet till rötning eller annan typ av stabiliseringsmetod uppgår slammängden till 30 kg TS/ansluten person. Mängden fosfor i rötat slam uppgår till ca 0,65 kg och kvävemängden till 1 kg/ansluten person och år. (Svenskt Vatten, 2013)

Idag utnyttjas ca 25 % av avloppsslammet till gödning på åkermark, vilket motsvarar ca 1 340 ton fosfor. Slammet lagras innan spridning för att genomgå hygienisering. Syftet med hygienisering är att ta död på patogena mikroorganismer genom förhöjd temperatur och under en viss exponeringstid. En vanlig hygiensieringsteknik för certifierat slam är långtidslagring i minst 6 månader. För kommande krav uppskattar Stockholm Vatten att mer avancerad teknik behövs för att hygienisera slammet, exempelvis värmebehandling med termofil rötning eller pastörisering vid 70 ^{0}C. Andra metoder som är att betrakta under utveckling eller fungerande och etablerade är exempelvis, autoklavering, termisk torkning, biologisk behandling, kemisk behandling, kalkbehandling och avancerad kompostering. (Norin, 2007)

Användandet av slam skiljer sig mellan länen i Sverige. Skåne har en stor areal åkermark och spred 2010 ca 13 000 ton slam. (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012). Användningsområdet för slam 2010 varierade och var till störst del komponent till anläggningsjord (32 %), slamspridning på åkermark (25 %), samt sluttäckning av deponi (20 %). (Linda Bäfver, 2013)

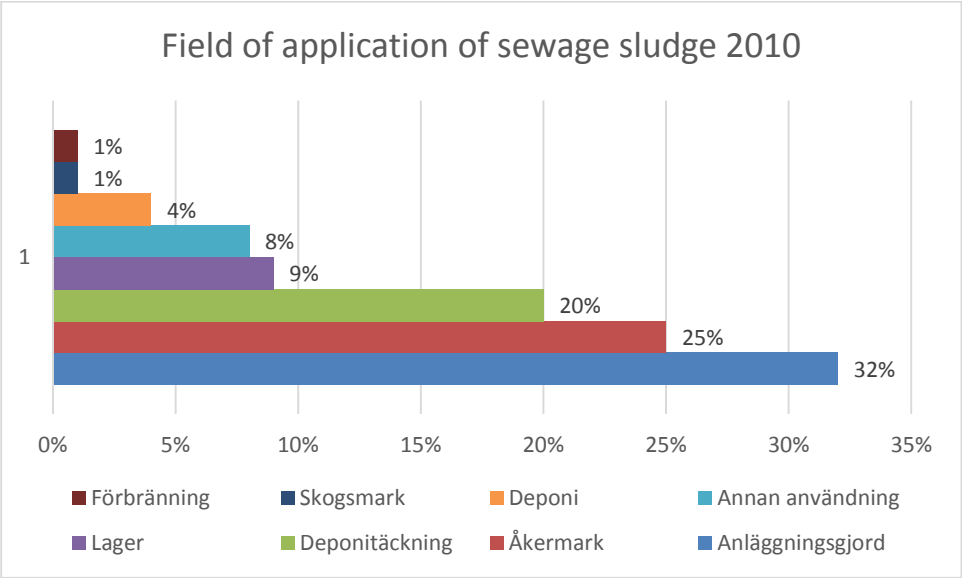

Figure 1. Field of application for digested sewage sludge 2010 (Linda Bäfver, 2013).

Figur 1 visar ett diagram över användningsområdet för avloppsslammet 2010. Förbränning av avloppsslam uppgår endast till 1 % enligt studien.

Naturvårdsverket har satt upp en aktionsplan för att på lång sikt återföra avloppsslam till mark, där näringen behövs utan att riskera miljö eller människans hälsa. (Naturvårdsverket, 2002)

Enligt aktionsplanen bör:

- Avloppsslammet erhålla tillräckligt god kvalité för återföring utan att riskera miljö eller människans hälsa.
- Åkermark eller annan mark i behov av näring, ses som recipient.
- Gödselmedel till viss del ersättas med avloppsslam.

Eftersom regelverk och förordningar angående spridning av avloppsslam förväntas bli skärpta i framtiden krävs det behandlingsmetoder för omhändertagande och utnyttjande av avloppsslam. Bland dessa behandlingsmetoder kan avancerade hygieniseringstekniker och förbränning anses som alternativ för utveckling. (Stockholm Vatten, 2013)

2.2 Rötrest

Rötrest avser det material som blir kvar efter rötning av organiskt substrat. Det kan vara rötning av matavfall, stallgödsel, grönmassa, skörderester eller annat organiskt material som har ett rikt innehåll av socker, stärkelse, fetter och proteiner förutom avloppsslam eller latrin. Även substrat innehållandes cellulosa och hemicellulosa kan rötas, men har en längre nedbrytningstid. Ligninet hålls intakt då den är onedbrytbar för mikroorganismerna. Syftet med att röta organiskt material är att producera biogas till användning som drivmedel eller som källa till annan energiförbrukning (SLU, 2013).

Rötningsprocessen sker under anaeroba förhållanden, det vill säga, under syrefria förhållanden i rötkammare där anaeroba mikroorganismer bryter ned organiskt material i olika nedbrytningssteg. Nedbrytningsprocessen har olika steg efterföljande varandra. I det första steget i processen bryts kolhydrater, proteiner och fetter ned till enkla sockerarter, aminosyror, fettsyror och alkoholer därefter bildas flyktiga fettsyror, ammonium och ammoniak. I det sista steget för nedbrytning bildas bl.a. acetat, väte och koldioxid. Dessa två sistnämna är essentiella för metanbildande bakterier att producera biogas. På grund av det energirika innehållet i matavfallet ger denna typ av avfall den bästa rötresten (SLU, 2013).

Certifierad rötrest kan spridas på åkermark och kallas vanligen biogödsel. Biogödseln är ett simplifierat uttryck för förnybar gödsel (BIOGAS öst, 2011). Rötrest likväl rötslam kan hygieniseras med meso- eller termofil rötning. För rötrest klarar den termofila rötningen hygieniseringskraven för bakterier och parasiter (Granström, 2014).

År 2013 producerades ca 990 000 ton våtvikt från samrötningsanläggningar och 373 500 ton våtvikt från gårdsbiogasanläggningar. Totalt ca 1,4 miljoner ton våtvikt rötrest och nästan 100 % av det användes som gödningsmedel. Mängden rötrest som faller under fraktionen matavfall uppgick år 2013 totalt till 306 751 ton våtvikt (Statens energimyndighet, 2013).

För Fortum Värme är det i huvudsak angeläget att använda rötrest från utsorterat matavfall. Uppskattningsvis finns det en tillgång på ca 50 000 ton rötrest att tillgå Fortum Värme, om 50 % av matavfallet återvinns i Stockholmsområdet (Lindman, 2015).

3. Regelverk idag och imorgon

I dagens läge är det tillåtet att sprida rötslam och rötrest på bruksmark, ca 84 % av slammet från reningsverk uppfyller kraven för användning på åkermark. (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012). För att samhället på ett hållbart sätt ska återföra dessa viktiga näringsämnen till arealer där behovet av kväve, fosfor och kalium är stort så krävs det en viss reglering i hur återförandet ska ske.

Användningen av slam på åkermark är för lantbrukaren kostnadsfri. Avloppsreningsverken betalar för transport, mellanlagring och spridning av slammet. Det innebär att om allt avloppsslam skulle återföras på bruksmark uppnår det 3 kg fosfor/hektar (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012). Avloppsslammet innehåller föroreningar som tidigare nämnt, tungmetaller, läkemedelsrester, smittoämnen och toxiska föroreningar som efter spridning, under längre perioder, kan ha negativ inverkan på miljön. Därför måste synvinkeln utgå från en etisk aspekt där man värderar både för och nackdelar med hanteringen, samt utvärderar vilka alternativa återföringsmetoder det finns.

I framtiden kommer troligtvis regelverk och förordningar att skärpas vad det gäller spridningen av rötslammet samtidigt som reningsverken arbetar kontinuerligt för att erhålla ett renare avloppsvatten. Troligtvis kommer motsvarande krav för avfallsförbränning att gälla i framtiden. För näringslivet gäller det att hitta alternativa metoder för att erhålla ett hållbart återförande av fosfor till bruksmark i förhållande till gällande och kommande regelverk. (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012)

3.1 Förordningar gällande spridning av avloppsslam

Nedan följer allmänna råd, lagar och förordningar för användning och spridning av rötslam på åkermark (Tideström, svensktvatten.se, 2008) (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012) (Naturvårdsverket, EG direktiv, 2013).

- I avfallsförordningen **(2001:1063)** § 42-45 är det en skyldighet att föra anteckningar och lämna uppgifter om avfall och dess hantering.
- Likaväl gäller det att regler utformas för drift och utsläpp till luft och vatten i förordningen om avfallsförbränning **(2002:1063)** vid förbränning av avfall så som avloppsslam.
- **SNFS (1994:2)** en kungörelse med föreskrifter om skydd för miljön med särskild inriktning på mark när avloppsslam sprids inom jordbruket. Syftet med den här föreskriften är att användningen av avloppsslam inom jordbruket ska hanteras på ett hållbart sätt så att skadliga effekter på mark, djur och människor förhindras.
- **SJVFS 2013:40** är en föreskrift som följer förordningar och allmänna råd från Statens jordbruksverk om miljöhänsyn i jordbruket som avser växtnäring. Behandlade områden är; § 8-21 Begränsningar av den mängd gödsel som får tillföras, § 21 bestämmelser om spridning av avloppsslam och § 22-28 försiktighetsmått vid spridning av gödsel.
- **SJVFS 2004:62** handlar om miljöhänsyn i jordbruket med avseende på växtnäring. I den här föreskriften finns bestämmelser om mängden fosfor som får tillföras jordbruksmark, max 22kg totalfosfor/hektar spridningsareal och år under fem kalenderår. I föreskriften finns även försiktighetsmått och spridningsbegränsningar på var i landet slam får spridas och till vilken markyta som räknas som spridningsareal.

Kvalitéten på slammet för jordbruksändamål följer gränsvärden enligt förordningen (**1998:944)** och kan tydas i **Tabell 1**.

Table 1. Heavy metal threshold in sewage sludge accordingly to 1998:944 constitution (Tideström, svensktvatten.se, 2008).

Substance	*Threshold mg/kg TS*	*Mean sludge quality mg/kg TS*
Pb	100	28
Cd	2	1
Cu	600	358
Cr	100	29
Hg	2,5	0,8
Ni	50	19
Zn	800	552
P-total	-	27000
N-total	-	42000

3.1.1 Revaq-Certifierat Rötslam

För att komma åt problem vid hantering av ett oundvikligt avfall så som avloppsslam har Svenskt Vatten tillsammans med andra intressenter utvecklat ett certifieringssystem som arbetar mot att minska flöden av farliga ämnen till reningsverk och skapa en hållbar återföring av växtnäring (Finnson, Årsrapport Revaq, 2014).

Enligt certifieringen garanteras spårbarheten för slampartier från de reningsverk som är anslutna. Slam innehållandes höga kadmiumhalter eller andra skadliga metaller används inte på åkermarker. Allt fler reningsverk i Sverige väljer att Revaq-certifiera sig vilket leder till en ökande problemhantering vid uppströmsarbete. 2008 var det 14 certifierade verk och under 2013 har siffran för certifierade reningsverk ökat till 39 stycken (Finnson, Årsrapport Revaq, 2014).

Syftet med Revaq-certifieringen är att förbättra och kvalitetssäkra reningsverkens arbete med avloppsslam, och samtidigt återföra näringsämnen från slammet till jordbruket. För att använda slam på åkermark är förutsättningen att ha klarat Revaq:s krav. Syftet är också att se avloppsslammet som en resurs, en biprodukt, och därmed kunna utnyttja dess medförande innehåll av näringsämnen (Finnson, Årsrapport Revaq, 2014).

Revaq-certifieringen arbetar med att sänka mängden tillförda tungmetaller på åkermark successivt genom uppströmsarbete med utgångspunkt från **SNFS 1994:2**. **Tabell 2** visar medelmängden tillförda tungmetaller där målet är att nå kadmiumhalter på 0,37 g/ha, år eller 17 mg Cd/kg fosfor senast 2025 (Finnson, Årsrapport Revaq, 2014).

Table 2. Mean contribute of digested sewage sludge to farm land in g/ha, year, (Marcus Öhman, 2014).

Substance	*SNFS 1994:2 g/ha, year*	*Revaq 2014 g/ha, year*	*Revaq 2017 g/ha, year*	*Revaq 2020 g/ha, year*	*Revaq 2025 g/ha, year*
Pb	25	25	25	25	25
Cd	**0,75**	**0,67**	**0,59**	**0,51**	**0,37**
Cu	300	300	300	300	300
Cr	40	40	40	40	40
Hg	1,5	0,93	0,74	0,55	0,23
Ni	25	25	25	25	25
Zn	600	600	600	600	600

Oavsett om slammet används på åkermark eller till förbränning, så är arbetar Revaq-certifierade reningsverk mot ett renare vatten och ett renare avloppsslam, med låg till mycket låga halter tungmetaller. Att redan i ett tidigt skede kunna reducera mängderna tungmetaller i avloppsslammet underlättar för utveckling av framtida återvinningsmetoder av näringsämnen både ur ett ekonomiskt och miljömässigt perspektiv.

3.2 Förordningar gällande Rötrest

Rötrester kan användas som gödselmedel om den är certifierad för ekologisk produktion. Certifieringssystemet ska försäkra användaren att rötresten har en låg kontamineringsgrad av riskfyllda ämnen så som metaller, smittoämnen, eller andra kemiska ämnen som utgör ett hot mot människan, djuren och den omgivande miljön. Rötresten behöver dessutom innehålla stor mängd växtnäring för att attrahera jordbruket (SLU, 2013).

I dagens läge finns det undantagsvis få lagkrav kring spridning av rötrest på åkermark, men eftersom innehållet påminner mycket om innehållet i rötslam med exempelvis tungmetaller och smittoämnen så kommer lagkraven vid hantering av rötrest troligen också att skärpas i framtiden.

Nedan finns allmänna lagkrav, förordningar och andra bestämmelser för lagring och spridning av rötrest och kompost:

- **SJVFS 2009:6** är en föreskrift om bestämmelser för att förhindra spridning av smittoämnen till djur och människor. Föreskriften beskriver bl.a. matavfall i form av kött- och benmjöl ska vid användning som organiskt gödningsmedel bearbetas. Föreskriften förespråkar även att organiskt gödningsmedel inte får släppas ut i oblandad form utan som en komponent i en blandning (Statens jordbruksverk, 2009).
- **SNFS 1994:2**, **1998:2** och **2001:5** är föreskrifter som innehåller bl.a. krav på innehållet av metaller i rötrester och andra föroreningar samt hur biogödseln bör spridas.
- **SNFS 2003: 15(19)** är en föreskrift om allmänna råd för lagring, rötning och kompostering av bl.a. matavfall. Matavfallet bör mellanlagras under varma årstider samt täckas vid slutet av varje arbetsdag. Rötningsprocessen bör ske kontrollerat och med uppsåt att samla in bildad vätska och gas i ett slutet system. Rötresten efter behandling bör vara salmonella fritt enligt kriteriedokumentet SPCR 120. Hanteringen av rötrest bör ske varsamt för att förhindra återinfektion och återväxt av smittoämnen, speciellt vid spridning som biogödsel på åkermarker (Naturvårdsverket, 2003).
- **SNFS 1998:808 (Miljöbalken)** en föreskrift om allmänna råd för mellanlagring, rötning och kompostering (Granström, 2014).

Användandet av rötrest som biogödsel hanteras både på EU- och nationell nivå. Naturvårdsverket har enligt en utredning lagt upp förslag till regeringen på hur mycket tungmetaller som får finnas i avloppsslam och biogödsel (Granström, 2014) .

3.2.1 Certifierad rötrest/biogödsel SPCR 120

För att rötresten ska få spridas på åkermark har *Avfall Sverige* lagt upp ett certifieringssystem där rötresten kan kallas biogödsel, **SPCR 120**. En certifierad fraktion av biogödsel måste uppfylla vissa kvalitetskrav som följer riktvärden för metaller, smittämnen samt synliga föroreningar som plast, glas och kompositmaterial. En god kvalité av biogödsel kan erhållas genom kontroller på anläggningar som behandlar rötrester samt att behandlingstekniken är tillräckligt bra för att erhålla bättre fraktioner biogödsel (Bramstorp, 2013).

3.3 Hållbar återföring av fosfor

För att erhålla ett hållbart återföringssätt av näringsämnet fosfor har regeringen satt upp förslag på hur återföringen ska ske med utgångspunkt från de resurser som finns.

- Återföra fosfor enligt miljömålssystemet på ett hållbart och resurseffektivt sätt i enlighet med miljökvalitetsmålet Giftfri miljö.
- Målen för det hållbara återföringssättet ska uppfylla de kriterier som regeringen ställt upp enligt miljömålssystemet
- Målen ska utformas i etapper som redovisar konsekvensbedömningar av erhållna förslag

Det hållbara återförandet av fosfor ska ske enligt generationsmål, miljökvalitetsmål och etappmål. Generationsmålet visar riktningen för hur samhället behöver omställas för att nå miljökvalitetsmålen. Miljökvalitetsmålen innefattar tillstånd i svensk miljö som miljöarbetet ska leda till. Etappmålen är stegvis tagna mål för att nå miljökvalitetsmålen. (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012)

Ett miljökvalitetsmål som anses vara ytterst viktig är *En giftfri miljö*. Målet syftar till att reducera farliga kemiska ämnen i produkter, varor och byggnader och förhindra att dessa tas upp av växter, djur och människor. Farliga ämnen som skapats eller utvunnits av samhället får inte utgöra ett hot mot människans eller djurens hälsa. De naturfrämmande ämnena får heller inte påverka den biologiska mångfalden eller utgöra andra hot mot växtlighet (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012).

Syftet med dessa mål är att bl.a. säkerhetsställa tillvaratagandet på fosfor samtidigt som utsläppsmängderna kombinerat med annat avfall trappas ned. Naturvårdsverket har även gett förslag på nya etappmål för regeringen som innefattar förslag om olika fosforåterföringsmetoder. Ett annat etappmål satt av Naturvårdsverket är att 2015 ska kadmiumexponeringen från föda och arbetet vara på en sådan nivå att den är säker ur ett långsiktigt folkhälsoperspektiv vilket följer miljökvalitetsmålet, *En giftfri miljö.* (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012)

3.3.1 Miljömålssystemet om fosforåterföring

Det finns ett delmål i miljömålssystemet att minst 60 % av fosforföreningarna i avlopp ska återföras till produktiv mark, varav minst hälften bör återföras till åkermark. Det innebär att mängden slam för återföring till produktiv mark behöver öka med 65 000 ton TS/år. (Lundh & Kjellström, 2014). Målet ansågs delvis orimligt och naturvårdsverket satte upp förslag på etappmål där minst 40 % av fosforn i avlopp bör återföras som växtnäring och 10 % av kvävet från avlopp återföras senast år 2018. Även stallgödsel ska tas tillvara på bruksmarker för att kompensera växtnäringsbalansen. (Naturvårdsverket, Hållbar återföring av fosfor, 2012).

4. Material och metoder

Aska efter förbränning av rötslam och rötrest innehåller exempelvis fosfor, aluminium, järn, silikater, tungmetaller och andra mineraler. Förbränning medför att oönskade organiska ämnen destrueras och energi i form av värme kan utvinnas till fjärrvärmenätet. Eftersom många av de störande ämnena förstörs under förbränning, kan askan, beroende på halten tungmetaller, spridas på åkermark. För att uppnå en miljömässig vinst kan askan genomgå en återvinningsprocess där fosfor kan utvinnas och tungmetaller separeras vilket också bidrar till *En giftfri miljö*. (Linda Bäfver, 2013)

4.1 Potential till förbränning i Sverige

Anläggningar som är anslutna till fjärrvärmenätet har en god anledning att elda slam. Förbränning av rötslam och rötrest bidrar till en stor samhällsnytta genom att reducera avfallsvolymer samtidigt som slammets energiinnehåll tas tillvara. (Linda Bäfver, 2013)

Eftersom Sverige har ett väl utbyggt fjärrvärmenät och en låg befolkningstäthet finns möjligheten att förbränna slammet i befintliga anläggningar. För att reducera fukthalten vid förbränningen kan samförbränning med ett torrare bränsle exempelvis biobränsle eller träflis var ett alternativ. (Linda Bäfver, 2013). Det kan vara lämpligt att samförbränna med biobränsle för att höja halten kalium och kalcium samt förbränna vid en hög bäddtemperatur för att driva av flyktiga miljöpåverkande ämnen (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012). Samförbränning med biobränsle är fördelaktigt då bränslet har låg askhalt, däremot har den en hög fukthalt (Lindman, 2015).

4.2 Tillgången på rötslam och rötrest

Stockholm Vatten AB ansvarar för hanteringen av avloppsvatten i Stockholm och närliggande områden. Totalt produceras ca 90 000 ton avvattnat slam/år från Henriksdal- och Brommaverket. (Svenskt Vatten, 2013).

4.2.1 Förbränning av rötslam och rötrest

Förbränning av rötslam och rötrest kan i Fortum Värmes fall ske i rosterpanna eller CFB-panna i form av mono-förbränning eller samförbränning. Ett väl avvattnat rötslam kan mono-förbrännas, dock krävs det ett stödbränsle vid uppstart. Mycket väl avvattnat slam kan förbrännas utan stödbränsle. (Svenskt Vatten, 2013). Mono-förbränning av slam är ett alternativ, men kan i längden anses som en ekonomisk svårighet eftersom fukthalten hos rötslammet är för hög vilket gör att värmevärdet blir för lågt. Ett annat alternativ är att samförbränna rötslam eller rötrest tillsammans med exempelvis biobränsle. Hur mycket slam som kan beblandas med biobränslet beror av slammets TS-halt och på vilket sätt det tillförs (Svenskt Vatten, 2013).

4.2.2 Samförbränning med Biobränsle

Askan i rötslammet innehåller en större mängd fosfor, jämfört med askan från rötrest. Om biobränsle blandas med 30 % rötslam uppnår fosforhalten i flygaskan till 3,5 %. Blandas däremot 30 % rötrest tillsammans med biobränsle uppnår fosforhalten 1,6 % i flygaskan. Detta kan skilja sig beroende på i vilken panna förbränningen sker. Vid behandling av askan kommer botten- och flygaska att blandas för att erhålla tillräckligt god koncentration av fosfor. För att det ska vara ekonomiskt försvarbart att utvinna fosfor ur aska krävs det en fosforhalt på 5-6 % i sammanslagen aska (Lindman, 2015).

Tabell 3 visar en bränsleanalys av rötslam från Henriksdal samt en matavfallsfraktion av rötrest. I tabellen kan det tydas vilken askhalt rötslammet och rötresten hade vid analysen samt vilka komponenter som identifierades. Rötslammet hade en askhalt på 37,7 % och rötresten en askhalt på 27,4 %.

Table 3. Fuel analysis of sewage sludge from Henriksdal and municipal food waste (Lindman, 2015).

	Digested sewage sludge Henriksdal	*Fraction of food waste*
C (% av torrt bränsle)	33,9%	39,5%
H (% av torrt bränsle)	4,9 %	5,7 %
S (% av torrt bränsle)	1,09 %	0,58 %
N (% av torrt bränsle)	4,3 %	3,6 %
Cl (% av torrt bränsle)	0,06 %	0,05 %
O (% av torrt bränsle)	18,1%	23,21%
Askhalt (% av torrt bränsle)	37,7%	27,4%
Fukthalt (% av inlämnat prov)	75 %	75 %
Värmevärde		
Effektivt värmevärde (MJ/kg bränsle)	1,6	2,2
Askanalys (mg/kg Torrt bränsle)		
Al	22 000	*Värde saknas*
As	5	*Värde saknas*
B	*Värde saknas*	*Värde saknas*

Ba		
Ca	23 000	45 800
Cd	0,78	0,5
Co	*Värde saknas*	*Värde saknas*
Cr	21	12,5
Cu	410	47
Fe	82000	*Värde saknas*
Hg	0,73	0,1
K	5400	24 700
Mg	4700	3900
Mn	300	*Värde saknas*
Mo	*Värde saknas*	*Värde saknas*
Na	2400	*Värde saknas*
Ni	20	6,6
P	**33 000**	**12 400**
Pb	20	6,7
Si	51 000	*Värde saknas*
Ti	*Värde saknas*	*Värde saknas*
V	45	*Värde saknas*
Zn	580	361

Tabell 4 visar asksammansättningen i rötslam och rötrest efter monoförbränning, beräknat utifrån en slam- och rötrest mängd på 72 000 ton med 25 % TS. Rötslammet hade en askhalt på 37,7 % och rötresten en askhalt på 27,4 % (Lindman, 2015).

Table 4. Composition of ash from mono-incinerated digested sewage sludge and municipal food waste in mg/kg ash (Lindman, 2015).

	Digested sewage sludge mg/kg ash	*Municipal Food waste mg/kg ash*
Ca	61008	167153,3
Si	135279	
K	14324	90146
Al	58355	
Mg	12467	14233,6
Fe	217507	
P	**87533,16**	**45255,5**
Na	6366	
Mn	796	
Ba		
Ti		
Zn	1538	1317,5
B		
Cu	1088	171,5
Ni	53	24,1

Pb	53	24,5
Cr	56	45,6
V	119	
Cd	2	1,8
Co	11	
Mo		
As	13	
Hg	2	0,4

4.3 Askans sammansättning

Vid förbränningen av rötslam och rötrester bildas aska i form av botten- och flygaska. Bottenaskan har en större partikelstorlek > 1-1,2 mm medan flygaskan består av mer fin partikulärt flyktiga ämnen. (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012)

Större delen av de oorganiska föreningarna stannar i bottenaskan, medan ökande förbränningstemperatur evaporerar tungmetaller så som kvicksilver och till viss del kadmium till flygaskan. Mindre flyktiga ämnen så som koppar och nickel förblir till större del stationär i bottenaskan. (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012)

Beroende på i vilken panntyp förbränningen sker så blir askformationen annorlunda. Exempelvis för en CFB-panna fördelas askan med ca 50 % bottenaska och 50 % flygaska. Vid förbränning i en rosterpanna förhåller sig större delen, ca 95 %, som bottenaska och 5 % som flygaska. Förbränning i en BFB förhåller sig ca 70 % som bottenaska och 30 % som flygaska. Fördelen med förbränning rosterpanna är att askan erhålls till störst del som bottenaska vilken är mer lätthanterlig och innehåller mindre föroreningar. Ett problem som kan uppstå vid förbränning i rosterpanna är att askan smälter och bildar härdade askgranuler vilket kan vara väldigt svåra att lösa upp eller separera. (Lindman, 2015)

Beroende på vad som förbränns så varierar mängden producerad aska. Mängden aska varierar dessutom beroende på fukthalten på materialet. Vid förbränning av biobränsle med en fukthalt på ca 47 % TS ger det en askhalt på 2,5 %. Förbränning av rötslam med en fukthalt på 75 % TS ger en askhalt på ca 38 % och för rötrest med samma fukthalt, en askhalt på ca 27 %. Mängden fosfor i rötslam är högre i jämförelse med biobränsle och rötrest. (Lindman, 2015)

5. EU-projekt: P-Rex & RecoPhos

P-Rex (*Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency)* är ett forskningsprogram uppsatt av EU:s sjunde ramprogram. Målet med projektet är att uppstyra miljömål som innefattar:

- Fosforåtervinningsprocesser med tillgängliga tekniska lösningar i fullskala
- Utvärdera kvaliteten på återvinningsprodukter med avseende på fosfor
- Marknadsundersökning för att upptäcka potential för ny teknik och nya produkter
- Strategisk utveckling för att bredda potentialen för fosforåtervinning
- Implementera fosforåtervinningsmetoder med ursprung från avloppsvattenströmmar med avseende på regional efterfrågan. (P-rex, 2015)

P-Rex projektet har olika arbetsområden med fördjupning i fosforåtervinning från aska, slam och slamspridning på åkermark. Syftet med projektet är att tilltala allmänheten så att medvetenheten och marknader för fosforåtervinning ökar (P-rex, 2015).

Ett annat forskningsprojekt som under 2013 och framåt bedrivs, är ”RecoPhos-projektet”, där man vill utveckla en hållbar och effektiv process för fosforutvinning ur aska från rötslam genom en termokemisk process. Syftet är att fosfater och tungmetaller utvinns ur hög tempererad aska från rötslammet.

6. Metoder för fosforutvinning ur aska

Processerna nedan beskriver fosforåtervinningsmetoder med olika typer av tekniker. Teknikerna involverar termokemiska- och våtkemiska fosforåtervinningsprocesser.

De flesta fosforåtervinningsmetoderna som redovisas är under utveckling och befinner sig på laboratorieskala eller i pilotskala och kan kräva ytterligare flera år av utveckling innan de når en kommersiell mognad. Däremot är det ett fåtal metoder som anses om ytterst intressanta och har stor potential för implementering i dagsläget eller inom snar framtid.

Termokemiska- och våtkemiska fosforåtervinningsmetoder:

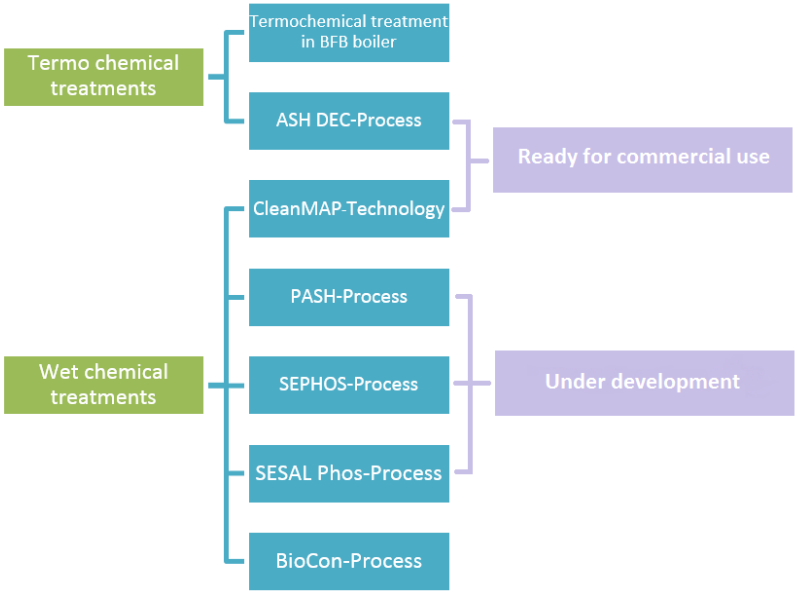

Figure 2. Thermo- and wet chemical phosphorus recovery treatments.

Figur 2 visar termokemiska- och våtkemiska fosforåtervinningsmetoder. ASH DEC-processen finns i kommersiellt bruk. CleanMAP-teknologin befinner sig i en förprojektering och är redo att tillgå kommersialisering inom närmsta åren. Termokemisk behandling i BFB-panna, SEPHOS-, PASH-, SESAL Phos-processen är under utveckling. BioCon-processen finns inte längre att tillgå.

7. Termokemiska fosforåtervinningsmetoder

I en termokemisk fosforåtervinningsprocess behandlas askan i en temperaturhöjande process i syfte att förgasa kvarblivande tungmetaller och minimera kontamineringsgraden av andra ämnen. Detta bidrar till en högre koncentration av fosfor i askan vilket gör att den kan användas direkt på åkermark eller att fosfor extraheras ur askan för produktion av gödningsmedel. De flesta tungmetaller förgasas vid närvaro av en kloriddonator, exempelvis $MgCl_2$. Olika tungmetaller förgasas vid olika temperaturer, generellt sker termokemiska processer vid 800 – 1000 °C. De flesta metallklorid-föreningar, utom koppar, förångas vid T < 1000 °C.

7.1 Termisk behandling av avloppsslam i BFB-panna från LTU/UmU

7.1.1 Processbeskrivning

En fosforåtervinningsmetod i ett tidigt utvecklingsstadium är termisk behandling av avloppsslam i en BFB-panna. Processen utvecklas i ett samarbete med Värmemekanik AB, avdelningen för energivetenskap vid Luleå Tekniska Universitet samt energiteknik och termisk processkemi vid Umeå Universitet.

Syftet med metoden är att förbehandla, granulera och torka avloppsslam i en trumtork och sedan återvinna kväve. Därefter förbränna det granulerade avloppsslammet i en BFB-panna. Det här kan ske i samförbränning med biobränsle för att erhålla hög halt av kalium och kalcium i askan och för att sänka fukthalten vilket ger ett bättre värmevärde. I förbränningen destrueras läkemedelsrester och patogener. Processen är en dekontamineringsprocess eftersom tungmetallerna under förbränning förångas och hamnar till stor del i flygaskan, medan bottenaskan (askgranulen) innehåller växttillgängligt fosfor i form av bl.a. whitlockit och kan användas som växtnäring men är inte än produktklassificerad (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012).

Processen består av fyra huvudsakliga processteg:

Steg 1 – Förbehandling i trumtork

Förbehandling med torkning av avloppsslammet i en trumtork. Trumtorken kan drivas av ånga. Rökgasrening med slangfilter krävs för rening av dioxiner och kloridföreningar.

Steg 2 – Kväveåtervinning

Ett potentiellt kväveåtervinningssteg efter torkningsprocessen. Syftet är att ammoniumjoner ska evaporeras och fångas upp i rökgasen. Därefter ska kvävet återföras till askgranulen som bildas i steg 4. Processteget är under utveckling. (Öhman, 2015)

Steg 3 – Granulering och torkning av avloppsslam

För att få ett mer lätthanterligt avloppsslam så granuleras/pelleteras slammet med tillsatts av ett granuleringsbränsle.

Steg 4 – Förbränning i BFB-panna

De granulerade/pelleterade avloppsslammet förbränns i en BFB-panna vid 800-1000 ^{0}C. Tungmetaller förångas och stor del av askan erhålls som bottenaska. I bottenaskan återfinns fosfor i bl.a. formen av

Whitlockit. För att forma en askgranul tillsätts bindningskemikalier innehållandes kalium och kalcium (Öhman, 2015).

Syftet med förbehandlingsmetoden är att få ut ett torrt granulerat substrat genom en torkningsteknik. Trumtorkningstekniken kan integreras i en förbränningsanläggning och producera granulerat material med en torrhalt på ca 85 % och ett värmevärde på 12-15 MJ/kg. Den här tekniken riktar sig till företag och organisationer som har möjlighet att ta emot mer än 1000 ton TS slam/år. (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012)

I **Figur 3** visas en bild över processen. BFB-pannan i bilden har ett inlopp av askgranul från torkningsprocessen till vänster i bild (Fuel storage) och utlopp upptill med en cyklon för infångning av flygaska.

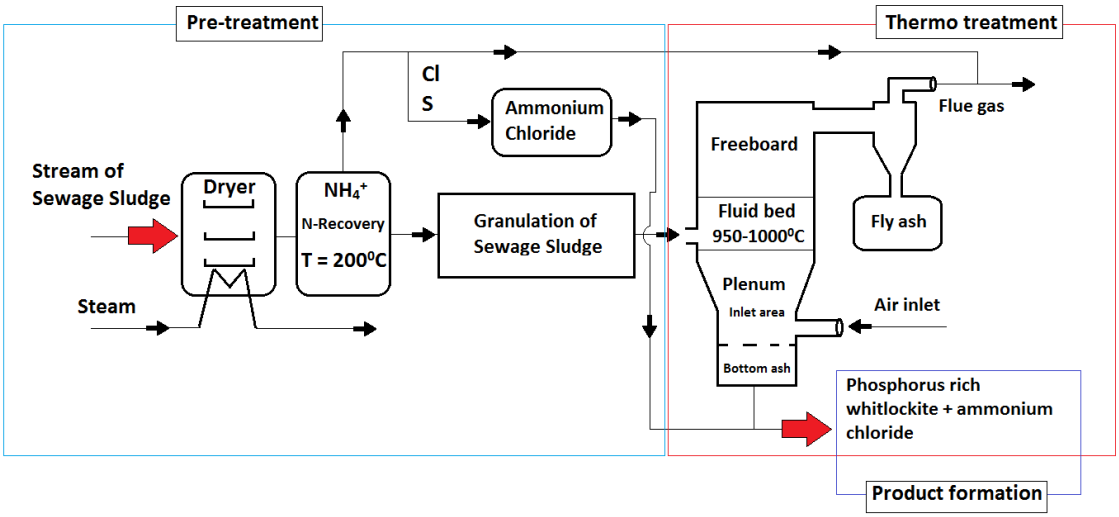

Figure 3. Process scheme of the thermo chemical treatment of sewage sludge in bubbling fluidized bed reactor.

Vid den termiska behandlingen drivs tungmetallerna, silver, kvicksilver och kadmium av då temperaturen i bädden överstiger 950-1000^{0}C. Nickel och koppar återfinns dock i askpellets och påverkas till stor del inte av den ökande bäddtemperaturen. (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012)

Rekommendationer vid förbränning:

- För att höja näringsvärdet kan kalium och kalcium tillsättas (från exempelvis, biobränsle).
- Erhålla så hög bäddtemperatur som möjligt, dels för att öka flyktigheten hos miljöpåverkande ämnen så som tungmetaller, dels för att minska uppehållstiden i bädden

Tillsats av kaliumrikt additiv ger en god effekt hos fosfor då denne visar stor affinitet till kalium under förbränningsprocessen och ger möjligheten till att skapa kaliuminnehållande fosfater. Däremot kan kaliumadditiv orsaka agglomerat i förbränningspannan. Agglomerat innebär att aska tillsammans med metaller, vanligtvis kalium, smälter ihop och bildar klumpvisa stenar. Agglomeratbildning är ett problem som gärna undviks i förbränningssammanhang (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012).

Förhållandet mellan kalcium, magnesium, kalium och fosfor är i processen helt avgörande, dels för att förhindra sintring, dels för att förhindra att fosforn blir volatil under förbränning.

Om slammet sameldats tillsammans med biobränsle ger det grunden till en ökad ekonomisk lönsamhet. Med den här tekniken återfinns fosforn i bottenaskan till skillnad från tidigare förbränningsförsök i CFB-panna, utan granulerad aska, då större delen förhöll sig som flygaska tillsammans med tungmetallerna.

7.1.2 Tidigare erfarenheter

Den termiska behandlingen i en BFB-panna är långt ifrån kommersiell, däremot har försök gjorts i bänk-/labbskala i en bädd med effekten 5 kW vid 800-950^{0}C. I försöket användes pelleterat slam som tidigare fälts ut med polyaluminiumhydroxiklorid och järn(II)sulfat. Efter förbränning gjordes analyser på flyg- och bottenaskorna med resultatet att ca 80 % av det oorganiska materialet behålls i bildad bottenaska där askpartiklarna gav en storlek > 1,2 mm. I askan återfanns till viss del mängder utav kalcium och fosfor, men fosfor återfanns till störst del som whitlockit $CaKMg(PO_4)_7$. Whitlockit är ett fosforrikt mineral där kalcium substituerats tillsammans med kalium, järn och magnesium. (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012)

Tekniken har genomgått bänkskaleförsök där andelen kvicksilver i försöket reducerades till knappt detekterbara nivåer i den producerade askpelletsen. (Marcus Öhman, 2014)

- Reduktionen av andra tungmetaller så som kadmium, zink, bly och arsenik reducerades till 20-40 % beräknat på ingående halt i slammet vid en bäddtemperatur på 950 ^{0}C.
- Jämförelsevis sjunker halten kadmium kraftigt relativt till fosforhalten i slammet.
- Uppskalningsberäkning visar att normala fosforgivor på 10-15 kg/ha och år till åkermark uppfyller majoriteten av producerade askpellets krav för kadmiumtillförseln på högst 37 g Cd/ ha och år.

I försök med samförbränning av slam och halm var TS-halten på ingående slam ca 25 % med ett värmevärde på 21,2 MJ/kg brännbart (2,65 MWh/ton TS). Ingående halm hade en TS-halt på 88 % och ett värmevärde på 4,64 MWh/ton TS (17,6 MJ/kg brännbart). (Marcus Öhman, 2014)

Denna termokemiska behandlingsmetod är i behov av ytterligare utveckling. Granulens fysikaliska egenskaper, hållfasthet och densitet, bör undersökas för olika blandningar samt inmatning och separationssteget av askgranul i större skala. Därefter krävs att tekniken demonstreras i större skala innan den kan kommersialiseras. (Marcus Öhman, 2014)

7.1.3 För- respektive nackdelar

Fördelar med en termisk behandling av avloppsslam i en BFB-panna (Marcus Öhman, 2014):

- Hög verkningsgrad ur ett energi- och återvinningsperspektiv
- Ett potentiellt kväve-återvinningssteg efter torkningsprocessen
- Avfallsvolymer reduceras, patogener destrueras
- Produkt i form av växttillgänglig fosfor
- Reduktion av bl.a. kadmium och kvicksilver
- Måttlig reduktion av andra tungmetaller (Ytterligare optimering krävs)

Vid en termokemisk behandling av avloppsslam finns det möjlighet att kontrollera processen genom förbränningstemperaturen, oxidations- och reduktionsmiljön samt kontrollera mängden bränsle som tillsätts för att på så sätt kunna styra processen mot de mest gynnsamma villkoren för fosforåtervinning. En kontrollerad process ger också bättre förutsättningar för att reducera oönskade miljöskadliga tungmetaller (Skoglund, Boström, Grimm, & Öhman, 2012).

Nackdelar utifrån dagens teknikläge av processen (Marcus Öhman, 2014):

- Tekniken finns inte att tillgå i fullskala. Krävs kompletterande försök i pilotanläggningar och optimerande av delsteg i processen.
- Granulens betalningsförmåga befinner sig i ett initialt skede. Askgranulen är inte produktklassificerad

Den här tekniken är beprövad i BFB-pannor medan Fortum Värme har tillgång till roster- och CFB-pannor. Skillnaden mellan panntyperna kan påverka mängden producerad bottenaska, då en BFB-panna tenderar att generera större mängd bottenaska. Däremot är pannegenskaperna tillräckligt lika, och med rätt optimering av processen så är förbränning i en CFB-panna möjlig (Öhman, 2015).

7.1.4 Kostnader

Följande lönsamhetskalkyl har inom ramen för ett tidigare EU projekt ”Noth Waste Infrastructure” i samarbete med bl.a. Luleå tekniska universitet (LTU). Den totala investeringen uppgår till 72Mkr med en annuitetsfaktor på 17,7 % och en pay-back tid på 4,4 år. (Marcus Öhman, 2014)

I investeringskalkylen i **Tabell 5** baseras på en slammottagningskapacitet på 8000 ton TS/år där investeringskostnaden uppgår till 72 Mkr för en helt komplett anläggning. Förutsättningarna är att transporterna sker inom en radie av 100 km med avvattnat slam, med en fjärrvärmeintäkt på 300 kr/MWh. Kalkylräntan uppgår till 12 % med en 10-årig avskrivningstid. Slamgranulerna som bildas i processen beräknas kosta 6,3 kr/kg fosfor. Jämförelsevis är kostnaden för slamspridning på åkermark ca 21-24 kr/kg. Är fjärrvärmeintäkten endast 230 kr/MWh med en produktintäkt på 23 kr/kg fosfor beräknas avkastningen bli 10 % vilket medför en 20-årig avskrivningstid. Lönsamheten är starkt beroende av fjärrvärmeintäkten, se **Bilaga 1**. (Lundh & Kjellström, 2014)

Table 5. Compilation of the most important factors concerning costs for the thermo chemical treatment in a BFB-reactor. (Öhman, 2015)

Cost factor	*Estimated value*
Investment	**72 MSEK**
Annual installment	17,7 %
Pay-back time	4,4 year
Capacity	> 1000 ton ash/year
Income district heating	300 SEK/MWh
Purshased bio fuel	200 SEK/MWh
Sum costs	**42,57 MSEK**
Sum income	**45,65 MSEK**

Data i **Tabell 5** är uppskattade kostnader enligt Svenskt Vatten Utveckling i samarbete med LTU. Se **Bilaga 1, Tabell A** och **Tabell B** för fullständiga ekonomiska uppskattningar.

7.2 ASH-DEC Processen

7.2.1 Processbeskrivning

ASH-DEC metoden är en dekontamineringsprocess som innefattar en termokemisk behandling av producerad flyg- och bottenaska efter förbränning av rötslam, rötrest eller djurspillning för produktion av förnybart fosfat till gödningsprodukter. Den termokemiska processen behandlar aska vid temperaturer kring 900-1050°C med en retentionstid på 20 minuter i en roterande ugn. Tungmetaller förångas under den termokemiska processen och kvar blir fosforrik bottenaska som med tillsatts av di-natriumsulfat (Na_2SO_4) producerar natriumkalciumfosfater ($NaCaPO_4$) som är växttillgängligt men inte produktklassificerad. Ett sekundärt tillskott av näringsämnen samt kompaktering till askgranul medför att produkten kan spridas på åkermark. (Outotec, 2014) (Jouni Havukainen, 2012) (P-rex, 2015).

Syftet med ASH DEC-Processen är att producera ett tungmetallfritt gödningsmedel som direkt ska vara applicerbar för näringslivet. Processen har beprövats i mini-/pilotskala under en längre tidsperiod med goda resultat. En anläggning i Tyskland och Österrike bedrivs i dagens läge i full skala. Även en anläggning i Holland med liknande driftparametrar pågår en förprojektering under decenniet. (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009)

Förbränning av rötslam eller rötrest kan ske i rosterpanna, CFB-, eller BFB-panna och askan som bildas i processen behandlas sedan ytterligare i en temperaturhöjande termisk behandling i en roterugn.

Steg 1 – Torkning och askbehandling

Aska blandas tillsammans med alkalisalter exempelvis natriumkarbonat (Na_2CO_3), natriumacetat ($NaC_2H_3O_2$) eller natriumsulfid (Na_2S) alternativt kalciumklorid ($CaCl_2$), natriumklorid (NaCl), magnesiumoxid (MgO) och natriumvätekarbonat ($NaHCO_3$). Ett annat alternativ är att tillsätta magnesiumklorid ($MgCl_2$). Anledningen till att kemikalier tillsätts är att dels uppnå en snabbare reaktion under den termiska behandlingen och för att möjliggöra bildning av metallklorider som förångas under förbränningen, och dels som bindningsmedel för att bilda askpellets. Tillsatsen av magnesiumklorid kräver en aska med pH ≤ 7. (P-rex, 2015)

Steg 2 – Termisk behandling

Bildade askpellets förs in i en roterugn där den termiska behandlingen startar. Temperaturen uppgår till ca 900-1050°C under 20 minuter. Vid T > 1000 ^{0}C garanteras tungmetaller så som, kvicksilver, kadmium, bly, koppar och zink som får reagera med alkalisalterna och bilda metallhydroxider och förångas. Arsenik och nickel är två metaller som inte bildar metallhydroxider eller metallklorider. Anledningen till att arsenik inte separeras är att den är relativt lik fosfor i den kemiska strukturen och påverkas inte av den höga temperaturen (R E Hester, 2013).

Steg 3 – Produktformation

Fosfor är relativ inert vad det gäller temperaturförändringar och förångas inte. De tungmetaller som reagerar och bildar metallhydroxider eller metallklorider tas om hand med avgasrening. (Jouni Havukainen, 2012)

Halten i den fosforrika askan är ca 26 %, bestående till stor del av natriumkalciumfosfater, som mixas, pelleteras och kyls av och kan användas till gödningsmedelsproduktion.

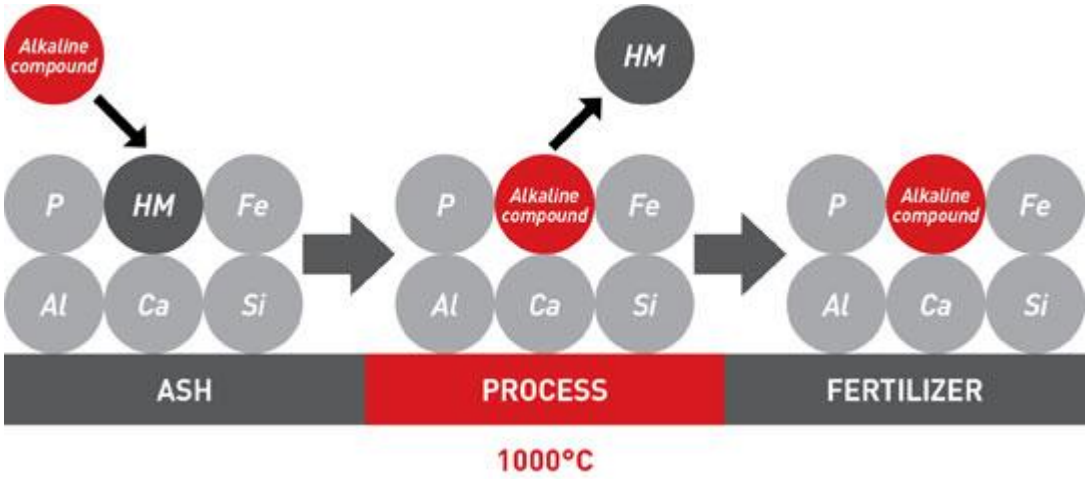

Figure 4. The ASH DEC-process, showing heavy metal evaporation at T > 1000 degree Celsius (Outotec, 2014).

Figur 4 visar att fosfor (P) tillsammans med bl.a. järn (Fe), Aluminium (Al) och Kalcium (Ca) inte förångas vid T > 1000 ^{0}C (Outotec, 2014).

Efter ursprunglig förbränning behandlas den bildade askan i ASH-DEC processen. Tungmetaller har till viss del separerats men den större mängden finns fortfarande kvar i flygaskan. Den huvudsakliga avskiljningen av tungmetaller sker under den termiska behandlingen av askan i roterugnen. De förångade tungmetallerna samlas upp i en luftavskiljare där ett filter förhindrar spridning av tungmetallerna. Avgaserna kan passera genom befintlig rökgasrening beroende på vilken av Fortums anläggningar, Högdalenverket, Bristaverket eller Värtaverket, förbränningen sker vid.

Figur 5 visar en förenklad processbild över ASH DEC-metodens olika processteg. De heldragna linjerna visar systemgränserna över processens tre olika processteg. Processens huvudsteg är askbehandlingen, termiska behandlingen och det slutgiltiga steget för produktion av mellanprodukten, natriumkalciumfosfat.

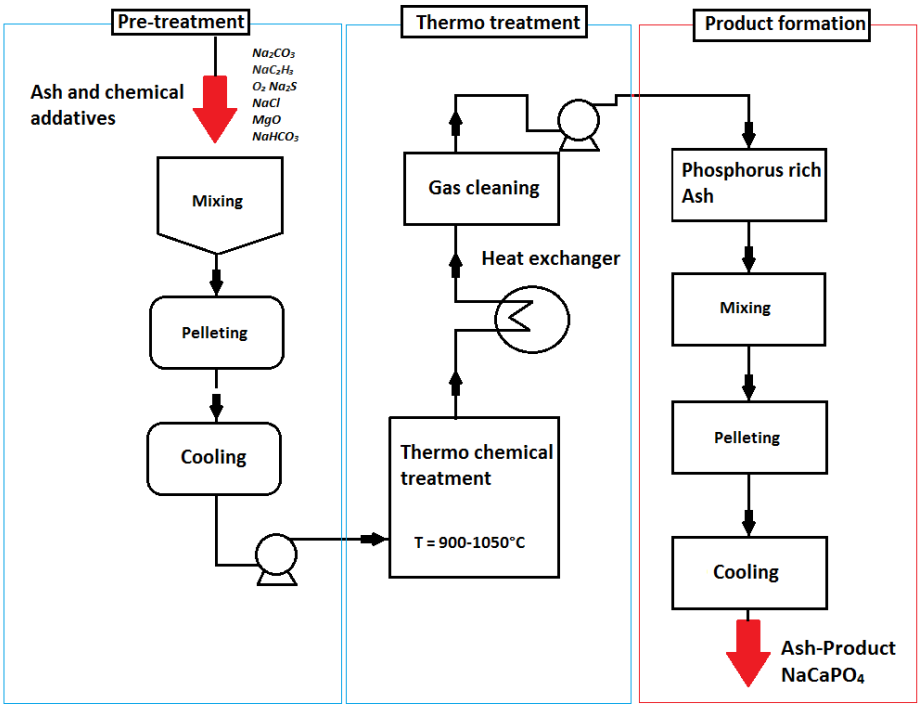

Figure 5. ASH DEC-process with pre-treatment, thermo chemical treatment and the product formation.

7.2.2 Tidigare erfarenheter

I Finland vid "*Lappeenranta University of Technology*" har en studie på förbränning av rötslam och djurspillning utförts. Rötslammet monoförbrändes i flerstegsugnar, BFB-pannor samt cyklon ugn. Undersökningen inkluderade Schweiz, Tyskland, Holland och Finland vars resultat redovisas under 7.2.1.1 Universitetsstudie från Lappeenranta.

7.2.2.1 Universitetsstudie från Lappeenranta

Enligt studien vid "*Lappeenranta University of Technology*" uppgick elförbrukning till 118 kWh/t_{ash} och gav en värmeproduktion på 520 kWh/t_{ash}. Fosfor i askan kan ligga bundet som P_2O_5 och hade en förväntad koncentration på 18 % +/- 2 %. Om lägre koncentration erhållits krävs det tillskott av fosfor till askan för att kompensera den låga halten. Till processen tillsattes även Natriumklorid (NaCl 46kg/t_{ash}), Magnesiumoxid (MgO 39 kg/t_{ash}) och Natriumvätekarbonat ($NaHCO_3$ 49 kg/t_{ash}). Energiförbrukningen, värmeproduktionen och tillsatta kemikalier beräknades utifrån att både rötslam och djurspillning behandlas i processen. (Jouni Havukainen, 2012)

7.2.2.2 Pilotanläggning i Österrike

ASH DEC-processen byggdes 2008 i pilotskala i Österrike, Leoben. Anläggningen designades för att i en kontinuerlig process behandla 7-10 ton/aska per dag. Askan efter förbränning lagras i en 24 m^3 silo där den termiskt behandlas vid ca 1000 ^{0}C under 20 minuter och kyls därefter av i en kylningsprocess. (Nieminen, 2010).

Pilotanläggningen i Österrike har produktion av ett gödningsmedel *PhosKraft PK Fertilizer*. Produkten är ett granulat och innehåller ca 12 % fosfor i form av P_2O_5 och har framställts genom att blanda termokemisk behandlad aska med kalciumklorid ($CaCl_2$) eller kalciumsulfat ($CaSO_4$), dessa erhålls som

biprodukter från biobränsle produktion. Anledningen att kalciumklorider och kalciumsulfater tillsätts är att erhålla en godare flyktighet av metallklorider. Energiförbrukningen uppges vara 0,6-0,7 MWh/ton produkt med en optimal dosering av 100g Cl/kg aska. Mängden tillsatta klorider kan anpassas för hur mycket tungmetaller som behöver avdrivas beroende på varierat innehåll från slam och regelverk för olika länder. Avskiljandet av tungmetallerna uppges vara bättre vid tillsats av $CaCl_2$. Däremot erhåller gödselprodukten en högre avkastning vid tillsatts av $MgCl_2$. (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009)

I **Tabell 6** redovisas tungmetallinnehållet i askan samt i gödningsmedelsprodukten producerat av anläggningen. (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009)

Table 6. Composition of ash from the pilot plant in Austria. Granulate compared to Sewage sludge ash (SSA). (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009)

	P_2O_5 (%)	*Cd mg/kg*	*Cr mg/kg*	*Cu mg/kg*	*Hg mg/kg*	*Mo mg/kg*	*Ni mg/kg*	*Zn mg/kg*	*Pb mg/kg*
Granulate	12	1,3	44	73	<0,1	7,9	18	99	11
SSA	21,5	3,5	79	450	0,6	11,8	55	1588	224

Halten fosfor i *PhosKraft PK Fertilizer,* beräknas vara 52 g P/kg, det ger en kadmium-fosfor kvot på ca 25 mg Cd/kg P. Om askan är obehandlad resulterar det i ett förhållande på 94 g P/kg aska och 37 mg Cd/kg P. En annan produkt, *PhosKraft NPK Fertilizier,* innehåller ett kvävetillskott men ger en lägre fosforhalt på ca 8 %. (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009)

Ytterligare en demonstrationsanläggning byggdes under 2014 i Weimar, Tyskland. Här används natriumsulfat som tillsattskemikalie. Enligt ett försök som P-REX utvecklat med ASH DEC-processen i roterugn användes naturgas som bränsle. Processen krävde: 0,8-0,9 kWh/kg återvunnen fosfor med en kemikalieförbrukning på; 3,3 kg Na_2SO_4, 1,3 kg torkat slam, 0,1 kg $Ca(OH)_2$ och 0,1 kg NaOH per kg återvunnet fosfor. (P-rex, 2015)

7.2.3 För- respektive nackdelar

ASH DEC-processen har ett liknande utförande som den termiska behandlingen av aska från rötslam i en BFB-panna utvecklad av LTU och i samarbete med värmemekanik AB. Skillnaden är att produktutfallet är annorlunda. I ASH DEC-processen utvinns en mellanprodukt i form av natriumkalciumfosfat och i termisk behandling i BFB-panna utvinns växttillgänglig aska som b.la. whitlockit. Båda processerna är dekontamineringsprocesser vilket innebär att ingen ny separat produkt bildas, utan växttillgängligt fosfor erhålls i askan och med hjälp av tillsatskemikalier kan askgranuler bildas. Bildade askgranuler från termisk behandling i BFB-panna är inte produktklassificerade. ASH DEC-processens bildade produkt kan anses som en mellanprodukt och med vidare behandling av tillsatskemikalier bilda *PhosKraft PK Fertilizer*.

Fördelar med ASH-Dec processen:

- Kommersiell process i Tyskland och Österrike
- *PhosKraft PK Fertilizer* följer EU:s standarder för gödningsmedel
- Låg metallhalt (0,1-0,4 mg Cd/kg P)
- Reduktion av avfallsvolymer genom förbränning, generellt för alla fosforåtervinningsmetoder
- Hygieniserad produkt; Destruktion av läkemedelsrester, smittoämnen och toxiska föroreningar

Nackdelar med ASH-Dec processen (Tideström, Teknik för fosforåtervinning ur avlopp, 2012) :

- Högt energibehov med torkningsprocess, dessutom en kemikaliekrävande process
- Tekniken kan anses som komplicerad eftersom det är många processteg. För att få processen kontinuerlig krävs det två separata delsteg för mixning och pelletering
- Går miste om näringsämnet kväve, inget kväveåtervinnande steg
- Kräver stor anläggningsvolym med roterugn
- Hög investeringskostnad, däremot komplett i jämförelse med andra återvinningsmetoder

7.2.4 Kostnader

Investeringskostnaden för ASH DEC-processen är 140-170 Mkr enligt beräkningar och uppskattande från pilotanläggningen i Österrike. Investeringskostnaden varierar dessutom beroende på om produkten som produceras ska vara tillräckligt ren för att direkt säljas som gödningsmedel, eller om ytterligare förädlingssteg krävs. Den uppskattade investeringskostnaden innefattar roterugnen, pelleterings-, mixnings-, kylnings-, pumputrustning samt en värmeväxlare och förvärmare, se **Figur 5**. Uteslutet är driftkostnaden för kemikalieförbrukning samt energibehov för torkning och förbränning.

Table 7. Estimated investment cost for ASH DEC-process. (Nieminen, 2010)

Cost factor	*Estimated values*
Investment	140-170 MSEK
Capacity	30 000 ton/year
Estimated selling (2008)	120-220 MSEK
Pay-Back time	3-4 year

ASH DEC-processen i en förbränningsanläggning med en kapacitet på minst 25 000 ton aska, beräknas ha en framställningskostnad på ca 19-22 kr/kg producerad fosfor. (Jouni Havukainen, 2012).

8. Våtkemiska fosforåtervinningsmetoder

För att möjliggöra utvinning av enskilda komponenter, i det här fallet ur aska från rötslam och rötrest, är upplösning att föredra som ett inledande steg. Till upplösningsstegen används bulkkemikalier så som syra eller bas, i det flesta fall saltsyra eller svavelsyra. Anledningen till att syra används är delvis för att kadmium har en dålig upplösningsgrad i baser. Bas används däremot till att höja alkaliniteten för att i efterföljande steg selektivt möjliggöra en utfällning av produkt vid valt pH. I en våtkemisk återvinningsprocess krävs också separationssteg, där bl.a. metaller och tungmetaller kan separeras. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012)

Mängden upplösta metaller i de våtkemiska återvinningsmetoderna är beroende av faktorer så som, mängden tillsatt aska och mängd syra eller bas som använts i upplösningssteget (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012).

Figur 6A visar koncentrationen av aluminium, järn och fosfor på y-axeln och pH-värdet på x-axeln. Både aluminium och fosfor tenderar att lösas upp i sur likväl basisk miljö vilket gör att kurvorna är väldigt lika. För koppar och zink i **Figur 6B** är kurvan annorlunda då upplösning i sur miljö startar vid ca pH 4.

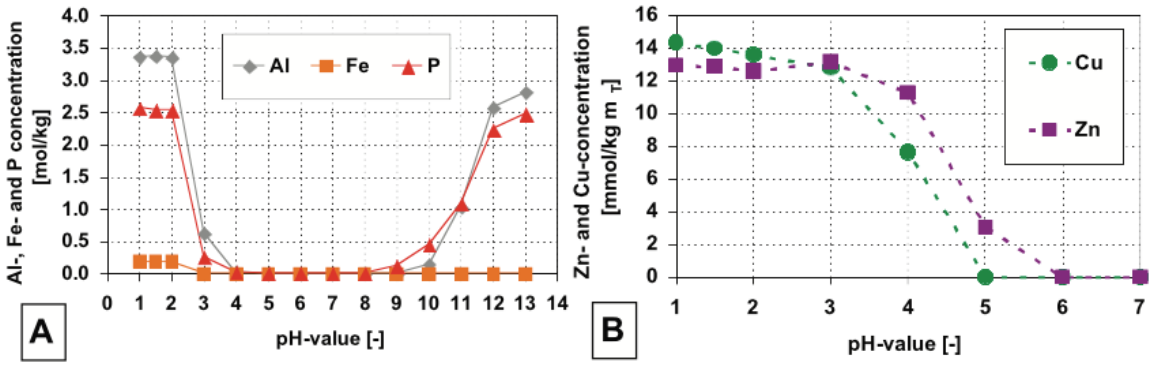

Figure 6, A och B. Dissolution for Al, Fe, P, Cu and Zn at low and high pH. (Schaum, Cornel, & Jardin, 2008)

8.1 CleanMAP-Technology

8.1.1 Processbeskrivning

EasyMining Sweden AB har utvecklat processer för fosforåtervinning ur olika råmaterial däribland fosforinnehållande askor. CleanMAP-Teknologin är en våtkemisk fosforåtervinningsmetod utvecklat av EasyMining. Processen kan hantera aska från mono- respektive samförbränt rötslam, massbalansen för processen, insatsmedel och produkter, beror av askans innehåll och den upplösningsgrad som uppnås (Enfält, 2015).

Aska från förbränning av rötslam och rötrest löses upp med syra i ett upplösningssteg, därefter filtreras oupplöst substrat och avskiljs från systemet i form av gips eller sand. I nästkommande steg separeras tungmetaller genom kemisk fällning. Därefter kan ammoniumfosfat utvinnas som fosforprodukt. Ammoniumfosfat har en hög renlighet, nästan 100 %, och är vattenlöslig vilket gör att den kan användas direkt som gödningsmedel. Metaller så som järn och aluminium separeras efter fosforutvinningssteget. Processvattnet recirkuleras och återanvänds till stor del. Fraktioner av processvattnet måste genomgå neutralisering och vattenrening. (Linda Bäfver, 2013).

Uppkomsten av ett processvatten är oundvikligt i de våtkemiska teknikerna. De tre viktigaste komponenterna för processen är aska, syra och kalk (Enfält, 2015).

Ur processen utvinns **(se figur 7)** (Patrik Enfält, 2014):

- Fosforprodukter, ammoniumfosfat och kalciumfosfat
- Fällningskemikalier, järnklorid och aluminiumsulfat
- Gips
- Lakningssand
- Tungmetallsulfider

I **figur 7** visas de olika processtegen i CleanMAP-technology utvecklat av EasyMining Sweden AB. Figuren visar förbehandlingsstegen följt av CleanMAP-teknologin och därefter efterbehandlingssteg för utvinning av metaller.

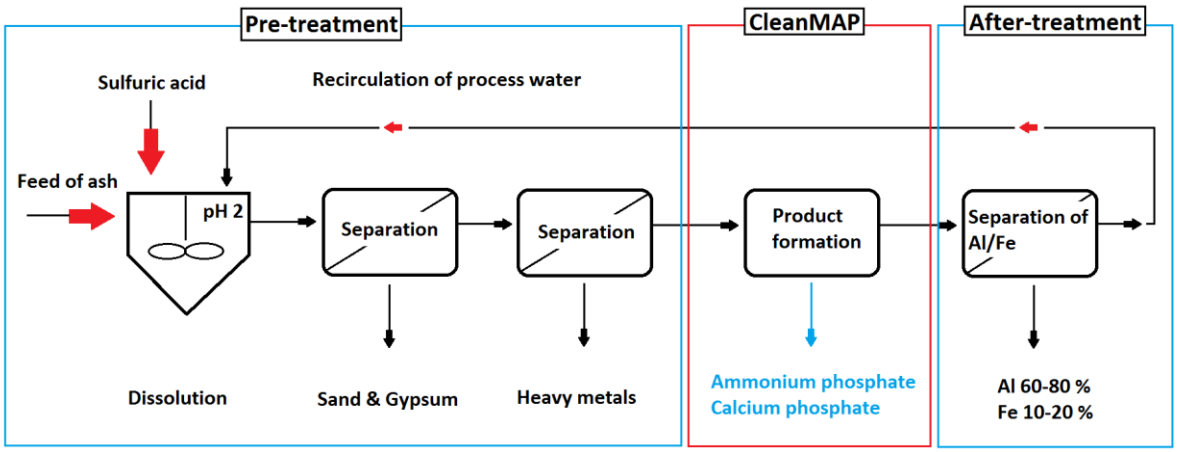

Figure 7. Pre-treatment, CleanMAP and After-treatment of the process.

Hela systemet går att anpassa utifrån det förutsättningar som askan innefattar. En komplett anläggning under projektering uppskattas ha en kapacitet på 10 000 – 30 000 ton aska/år, anpassningsbart efter behov och tillgänglighet. (Patrik Enfält, 2014)

Steg 1 – Upplösning av aska med syra

Aska från förbränt rötslam blandas med vatten i en upplösningstank tillsammans med svavelsyra för upplösning, till ca pH≦2. Regleringen av pH sker med kontinuerlig tillsats av koncentrerad svavelsyra. Reaktionstiden i upplösningssteget uppgår till 30-120 min vid rumstemperatur. Upplösningssteget domineras av katjoner så som H^+, Na^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{3+} samt Al^{3+}. (Uppsala, Sweden Patentnr 20100068113, 2007)

Fosfor har en god affinitet till Ca, Fe och Al och kräver ca 3 mol H^+/ mol P, för att lössliggöra dessa föreningar. (Linda Bäfver, 2013). Beroende på vilken asksort som hanteras i systemet kan tillsats av olika styrkor på svavelsyra adderas för att erhålla en god upplösning av askan. Däremot kan en hög koncentration av svavelsyra resultera i att fosforupplösningen hämmas och istället gagna formationen av metalloxider.

Steg 2 - Filtrering

Efter upplösningssteget pumpas substratet in i ett vakuumbandfilter där tyngre produkter kan avskiljas så som sand, gips, silikater, och icke lösliga metalloxider. Gipset är rent och väl definierat och kan användas till konstruktion av gipsplattor eller som utfyllnadsmaterial. Mängden gips som avskiljs beror på halten kalcium i askan. Ca 50 % av ingående aska avskiljs som sand. Sanden kan användas som lakningssand. (Linda Bäfver, 2013).

Steg 3 – Separation av tungmetaller

I det här steget separeras tungmetaller genom tillsats av sulfidföreningar. Innehåller lösningen aluminiumsulfat eller aluminiumklorid, adderas natriumsulfat eller svavelväte. Tungmetallerna fälls ut som sulfider och aluminium blir kvar i löst form (Uppsala, Sweden Patentnr 20100068113, 2007),

Består eluatet huvudsakligen av järnsulfater eller järnklorider separeras eluatet i två fraktioner. Därefter fälls tungmetallerna ut som sulfider i den ena fraktionen. Tungmetallerna erhålls i en fast fraktion genom filtrering eller centrifugering. Tungmetallerna går som en separat biprodukt för deponering. (Uppsala, Sweden Patentnr 20100068113, 2007).

Steg 4 – Separation med jonbytare

Efter filtreringssteget passerar den nu upplösta askan en katjon- respektive anjonbytare. Jonbytarna innehåller fosfor- och svavelsyra med syratålig jonbytesmassa. Om systemet hanterar aska från rötslam bör förhållandet mellan svavel- och fosforsyran vara 1:1. Jonbytesmassan regenereras med salt- eller svavelsyra. (Uppsala, Sweden Patentnr 20100068113, 2007)

Steg 5 – Utvinning av fosforprodukt

Huvudsteget i processen involverar produktionen av tri-ammoniumfosfat med nästan 100 % renhet. Ett överskott av ammoniak trycksätts i processen och fäller ut fosfor som tri-ammoniumfosfat. Återstoden av ammoniak recirkuleras för maximalt nyttjande. Fosforprodukten kan även utvinnas i form av kalciumfosfater. Ammonium- och kalciumfosfat är produktklassificerat och kan säljas direkt som gödningsmedel.

Steg 6 – Separation av aluminium och järnkatjoner

Innehåller kvarblivande eluat, aluminium- och järnkatjoner, beblandas lösningen med kalk.

Kalk tillsätts för att öka alkaliniteten och reagera med metaller så som järn och aluminium och bilda järn- och aluminiumsalter som kan säljas för ca 1500-2000 kr/ton. Aluminium separeras till ca 60-80 % och järn till 20-40 %. Det här steget är nödvändigt för att undvika ytterligare kontaminering av processvatten. (Patrik Enfält, 2014) (Linda Bäfver, 2013)

Processvattnet som bildas i processen recirkuleras tillbaks i processen, en liten fraktion tas ut för vattenrening.

8.1.2 Tidigare erfarenheter

Samförbränning och fosforutvinning ur aska

I ett projekt finansierat av WasteRefinery där samförbränning av rötslam och Returflis (RT-flis) testades visade det sig att samförbränningen med tillsats av större mängd slam i förhållande till andelen RT-flis bidrog det till att konsistensen hos askan förändrades och att mängden fosfor i slambränsleblandningen ökade. Projektets laboratorieförsök beskrivs nedan.

Laboratorieförsök med CleanMAP-teknologin

Analyser av bottenaska och flygaska gjordes efter samförbränning med 45 % slam och 55 % RT-flis. Storleken på bottenaskan blev grusliknande. Klumpar och agglomerat uppstod om en ökad

inblandning av slam till RT-flis tillsattes. Förbränningen skedde i en rosterpanna där större delen av askan består av botten aska (ca 95 %) och mindre del flygaska (ca 5 %). (Linda Bäfver, 2013)

Två stycken slambränsleblandningar testades där sammansättningen i försök 1 bestod av 35 % slam och 65 % RT-flis. Slambränsleblandningen med 35 % slam innehöll 22 300 – 29 300 mg fosfor/kg vilket är 2,2 – 2,9 %. I försök 2 ökades sammansättningen i slambränsleblandningen till 45 % slam och gav ett analysresultat av 3,8 - 3,9 % fosfor i bottenaskan. Bottenaskans storlek var oberoende av mängden slam, både 35 % och 45 % slam gav en partikelstorlek på 2 mm. Analysen för flygaskan, visade att storleken < 0,5 mm för ca 70 % av materialet. Svavelhalterna varierade mellan 0,1 och 0,3 %. Klorinnehållet i askorna varierade mellan 11 – 121 mg/kg ts. Klorhalten varierade kraftigt beroende på vilken fraktion av RT-flis som användes. (Linda Bäfver, 2013)

EasyMinings teknologi för slamaskor är nära ett kommersiellt genomförande. Processen har testats i både laboratorie- och pilotskala. En komplett anläggning under pågående projektering ska ha en kapacitet att behandla 10 000 – 30 000 ton aska/år. Dessa askmängder innehåller ca 800-2400 ton fosfor. Drifttiden för anläggningen är 7 500 h/år vilket innebär att 1,5 - 4,0 ton aska kan behandlas per timme. Eftersom Sverige uppskattas ha en produktion på ca 1 000 000 ton avvattnat avloppsslam med en TS-halt på 25 % motsvarar 250 000 ton TS och en askhalt på ca 40 %. Om allt detta slam förbränns skulle askmängden uppgå till ca 100 000 ton.

Anläggningens volym kommer i relativitet till andra metoder infinna sig som liten då drifttiden i förprojekteringen motsvarade två driftförsök, 4000 respektive 7500 timmar. Det motsvarar en hantering av ca 4 ton aska/h. Återvinningen av fosfor uppgår till ca 500 kg/h, vilket motsvarar 2000-4000 ton P/år, i form av tri-ammoniumfosfat. (Enfält, 2015)

8.1.3 För- och nackdelar med processen

Enligt EasyMining är processen lätt att implementera i redan befintlig anläggning. Processen medför en rad olika fördelar och den har visat sig vara energi- och resurseffektiv eftersom tillsatskemikalier blir en del av produkterna (Patrik Enfält, 2014).

Fördelar med EasyMinings askprocess:

- Systemet är relativt litet (behandling av 1,5-4 ton aska/h) och kräver inte lika stor anläggningsvolym som exempelvis ASH DEC-processen med roterugn.
- Välkända rena fosforprodukter ammoniumfosfat och kalciumfosfat är produktklassificerat och erhålls till nästan 100 % renhet
- Energieffektiv (Ingen torkning/förbehandling krävs)
- Låg driftskostnad
- Låg kontamineringsgrad av produkter
- Lågt kadmiuminnehåll efter tungmetallseparering

Nackdelar med EasyMinings askprocess:

- Skapandet av ett processvatten som måste genomgå neutralisering och vattenrening. Dock är processvattnet ett oundvikligt avfall hos alla de våtkemiska metoderna.
- Svårt att lösa upp härdad bottenaska, kräver förbehandling/krossning
- CleanMAP-teknologin är inte etablerad i fullskala

Eftersom processen är under utveckling och försök ännu inte gjorts i fullskala, är slutsatser kring metodens för- respektive nackdelar dragna utifrån ett helhetsbedömande perspektiv givet av redovisade laboratorieförsök, bänkskaleförsök samt förprojektering.

8.1.4 Kostnader

Processen finns inte att tillgå för kommersiellt bruk. Däremot är processen i ett sent utvecklingsstadium och kommer finnas tillgänglig inom en snar framtid. En ekonomisk kostnad kan endast uppskattas utifrån de driftskostnaderna för kemikalieanvändningen i processen. Det ekonomiska utfallet beror av ett antal parametrar så som anläggningens storlek, askans innehåll av fosfor, järn och kalcium (Enfält, 2015). Systemet kan vara helt anpassningsbar beroende på vilken anläggning den implementeras till samt tillgången på aska.

8.2 PASH-processen

8.2.1 Processbeskrivning

PASCH-processen utvecklades under ett projekt som tyska regeringen startade för återvinning utav näringsämnen, ”Recycling management of plant nutrients”. PASH-processen (Phosphorus recovery from Ash) är en våtkemisk lakningsmetod som återvinner fosfor i formen av kalciumfosfat från förbränningsaska från rötslam och separerar metaller och tungmetaller genom separation och kemisk fällning.

Steg 1 – Upplösning, separation och lakningsrening

PASH är en lakningsmetod där två separata inlopp av aska och saltsyra möts i en reaktor för upplösning. För högsta upplösningsgrad av aska används 8 % saltsyra vid rumstemperatur. Vid högre temperaturer erhålls högre koncentration av upplöst järn, vilket kan hämma utfällning av fosfor i utfällningssteget. (MEAB, Metallextraktion AB, 2009)

Lakningslösningen passerar ett filter eller lamell separator för att separera oupplöst material. Filtret tvättas med vatten för att spola av eventuellt restmaterial som fastnat i lamell separatorn/filtret.

Steg 2 - Extraktionssteg

Filtratet separeras från aluminium genom kemisk utfällning. Därefter behandlas filtratet i ett extraktionssteg där tillsatsen av extraktionskemikalier så som Alamine 336 och tri-butyl-fosfat (TBP) sker. Alamine 336 är en amin-baserad (tri-octyl/dodectyl-amin) vattenolöslig molekyl (BASF SE, 2013). TBP är en ester som bildar hydrofobiska komplex med jordartsmetaller och fungerar som en tungmetallextraktor i processen (Nieminen, 2010). Efter extraktionssteget tillsätts kalk i en reaktor med omrörning med en uppehållstid på 15 minuter (Nieminen, 2010). Kalk tillsätts för att höja pH och möjliggöra utfällning av kalciumfosfat. (MEAB, Metallextraktion AB, 2009)

Steg 3 – Separation av tungmetaller och kalciumfosfat

Fast fraktion separeras från vätskefraktionen vid tillsatts av vatten. Reaktionstiden för extraktionssteget är 15 minuter för att få en tillräcklig reduktion av tungmetaller. Koncentrationen av tungmetaller och järn reduceras med 95- respektive 99 %. Produkten utvinns som i form av kalciumfosfat och kan säljas direkt som gödningsmedel (MEAB, Metallextraktion AB, 2009).

Figur 8 visar ett processchema av PASH-processen med dess huvudsakliga processteg.

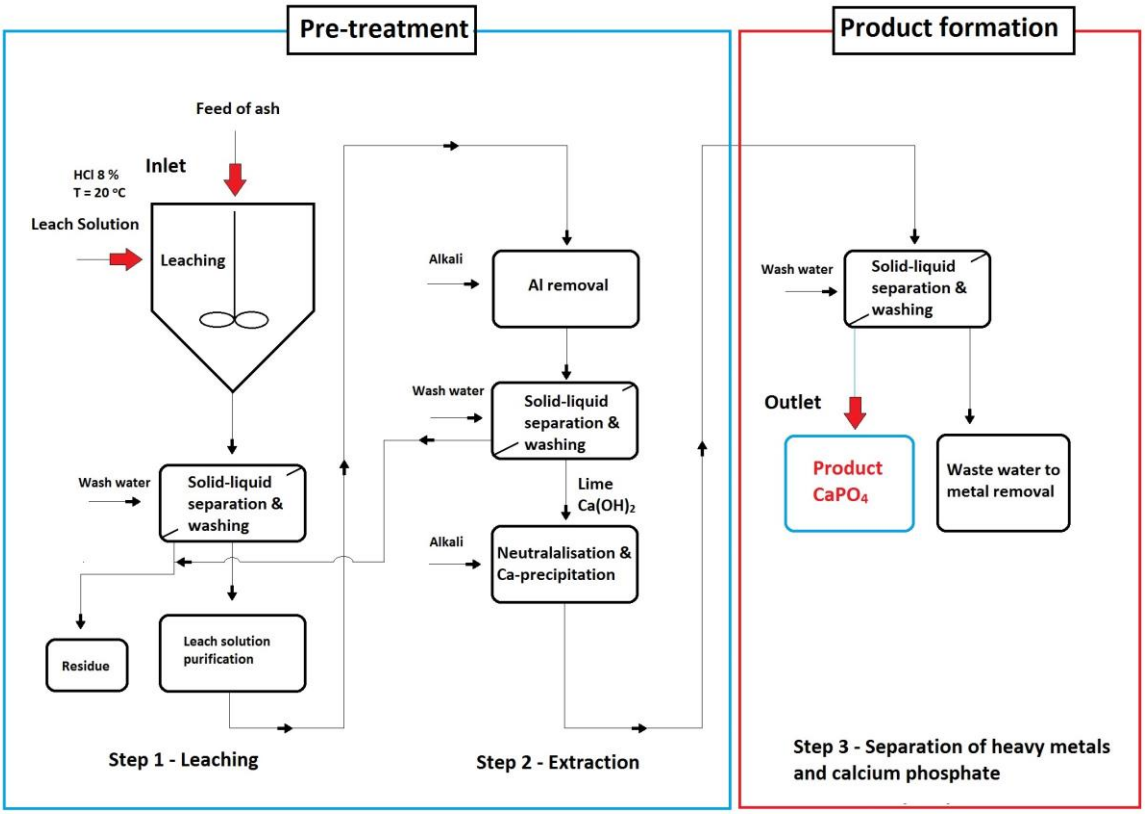

Figure 8. The PASH-process three different process steps.

PASH-processen är utvecklad av *Institute of Applied Science (IAP)* i Tyskland men är fortfarande under utveckling. Från Metallextraktion AB i Sverige finns PASH-processen i projektform som startades 2010.

8.2.2 Tidigare erfarenheter

Enligt en tidigare studie utfört 2009 av *Montag* och *Pinnekamp* undersöktes lösligheten utav fosfor tillsammans med natriumhydroxid, fosforsyra, svavelsyra och saltsyra. Resultatet visade att saltsyra hade en upplösningsgrad på 90 % till skillnad från natriumhydroxid där endast 25 % av fosforn löstes upp. **Tabell 8** visar resultatet av upplösningsproverna.

Tabell 8. Degree of dissolution of phosphorus together with NaoH, H_3PO_4, H_2SO_4 or HCl (Montag, 2009).

Chemicals	*Degree of dissolution*
$P + NaOH$	25 %
$P + H_3PO_3$	50 %
$P + H_2SO_4$	80 %
$P + HCl$	90 %

Upplösning med saltsyra kräver ingen eller låg extern värmetillförsel då upplösningen av fosfor är tillräcklig vid temperaturer kring 35 – 40 °C. Temperaturer över 40 °C ger negativa effekter där koncentrationen av järn ökar. PASH-Processen är den fosforåtervinningsmetod som ger högst verkningsgrad med en återvinning på ca 90 % (Montag, 2009).

8.2.3 För- och nackdelar

PASH-processen är en relativt dyr återvinningsmetod (se 7.2.4 Kostnad för processen) med ett pris på 28kr/kg återvunnen fosfor. Metoden medför däremot en rad viktiga fördelar och kan i framtiden vara av större ekonomiskt intresse.

Fördelar med PASH-Processen:

- Upp till 80-90 % fosforutvinning med saltsyra. Extraktion av järn med 99 %, andra metaller, Cd, Zn och Pb med 95 % (Montag, 2009).
- Ingen temperaturhöjning nödvändig (T<40 ^{0}C) vilket innebär mindre energibehov än termiska metoder
- Kort retentionstid ca 15 min
- Produkten erhålls i form av kalciumfosfat och kan användas som gödningsmedel
- Bulkkemikalier erhålls relativt billigt. Syror ca 3 öre/mol, baser ca 10 öre/mol

Nackdelar med PASH-Processen:

- Många processteg vilket kan kräva stor anläggningsyta för implementering
- Skapandet av ett processvatten som måste genomgå neutralisering och vattenrening. Dock är processvattnet ett oundvikligt avfall hos alla de våtkemiska metoderna.
- Metoden är under utveckling och finns inte att tillgå i industriell skala

8.2.4 Kostnader

Montag och *Pinnekamp* gjorde en uppskattning PASH-processens kostnad med vikt baserad på investeringskostnader så som byggnad, ingenjörsmässig kostnad, mekanisk och elektronisk utrustning som visas i **tabell 9** (Montag, 2009). Förbränningspanna ingår inte i den uppskattade investeringskostnaden på 46 Mkr. En fullskalig anläggning beräknas ha en kapacitet på 30 000 ton aska/år med en fosforåtervinning på ca 1 700 ton/år. Driftskostnaden uppskattades till 37 Mkr.

Table 9. Investment and operating costs of the PASH-process (Montag, 2009).

Cost factor	*Estimated value*
Investment cost	46 MSEK
Operating cost	37 MSEK
Capacity	30 000 ton ash/year
P-recycle	1 700 ton/year

Kostnaden för PASH-processens återvunna fosfor uppskattas till ca 28-38 kr/kg fosfor. Försäljningspriset för återvunnen fosfor är ca 3 kr/kg (Montag, 2009) (Baresel, o.a., 2014).

8.3 SEPHOS-processen

8.3.1 Processbeskrivning

SEPHOS-processen (Sequental Precipitation of Phosphorus) är en våtkemisk process som använder fällningskemikalier för att utvinna fosfor från aska ur förbränt rötslam. Processen är uppdelat i fyra processteg, upplösningssteg med svavelsyra, kemiskt fällningssteg av aluminiumfosfat, följt av ett upplösningssteg och slutligen ett kemiskt fällningssteg av fosfor med Ca^{2+} för att bilda produkten kalciumfosfat som kan användas som gödningsmedel.

Steg 1 – Upplösning med svavelsyra

Processen kräver surgörning med svavelsyra för att nå pH < 1,5. pH-sänkningen innebär att fosfor och de flesta tungmetaller löses upp. Olöst material separeras från processen.

Steg 2 – Fällningssteg av aluminiumfosfat

I nästkommande steg tillsätts natriumhydroxid för att höja pH till 3,5. Anledningen till en pH-höjning är att aluminium fäller ut fosfor vid aktuellt pH och bildar SEPHOS-produkten aluminiumfosfat ($AlPO_4$) medan koppar och zink fälls ut vid pH > 3,5, se **figur 6A**. Tungmetallerna hålls upplösta och påverkas inte av den svaga pH-höjningen. (Nieminen, 2010) (Schaum, Cornel, & Jardin, 2008)

I **figur 9** visas SEPHOS-processens olika steg, med kemikalietillsats och utgående bildad produkt. Figuren visar även askans inmatning och tungmetallernas separation.

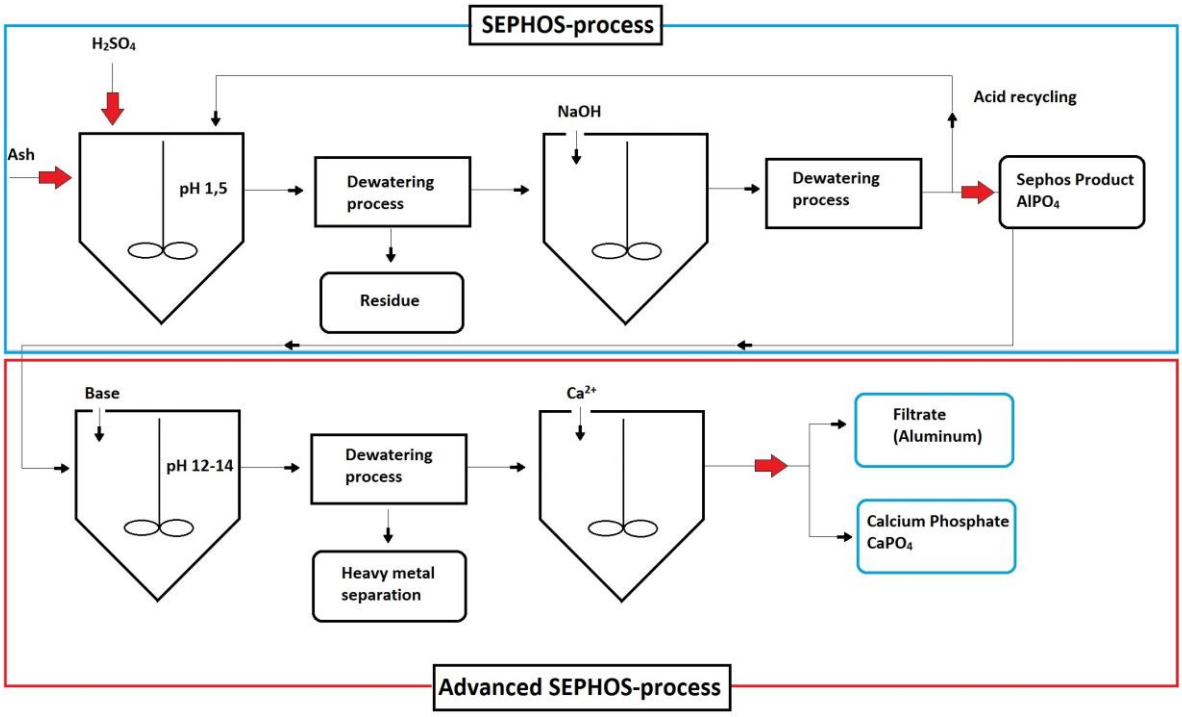

Figure 9. Shows the SEPHOS-process combined with the "Advanced section" of the SEPHOS-process currently under development.

Aluminiumfosfatet kan inte användas som gödselprodukt i jordbruk då aluminium kan orsaka vävnadsskada på växters rötter. Vid det här stadiet kan SEPHOS-produkten ($AlPO_4$) genomgå ett processteg som kallas "*Advanced SEPHOS-Process*" där bl.a. svavel tillsätts för att binda aluminium (Nieminen, 2010). Det avancerade steget är fortfarande under utveckling.

Steg 3 – Upplösningssteg av aluminiumfosfat

Här sker ytterligare en tillsats av bas för att öka alkaliniteten och lösa upp aluminiumfosfater. Syftet är att uppnå ett pH mellan 12 – 14. Medföljande tungmetaller behålls solida och separeras i nästkommande avvattningssteg. Ett alternativt elektrokemiskt processteg för SEPHOS-produkten är under utveckling och kräver ytterligare tester och försök i labb/bänks-skala för att effektivisera och utvärdera metoden (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012) (Nieminen, 2010).

Steg 4 – Fällningssteg med kalciumjoner

Upplöst aluminium och fosfat pumpas vidare till en reaktor där positivt tvåvärda kalciumjoner (Ca^{2+}) tillsätts för utfällning av fosfor till kalciumfosfater. Efter reaktorn sker en separation där kalciumfosfatet separeras som produkt och aluminiumet kan återanvändas som utfällningskemikalie. (Nieminen, 2010)

8.3.2 Tidigare erfarenheter

Enligt en analys utförd på bildad produkt och askan för jämförelse var fosforinnehållet 12 % i ”SEPHOS-produkten” och 8 % i askan. Tungmetaller i processen reducerades med ca 70 – 90 %. (Nieminen, 2010)

Enligt en tidigare studie av processen, var ett tillägg av sulfider innan de pH-höjande steget, ett resultat av mindre mängd kadmium och koppar i SEPHOS-produkten. Ett tillägg av natriumsulfat innan de pH-höjande steget bidrog till lägre koncentrationer av kadmium och koppar med 50– respektive 90 %. (Nieminen, 2010)

Vid universitetet RWTH Aachen utfördes ett experiment med nanofiltrering för separation av fosfor och ytterligare separation av tungmetaller. (Schaum, Cornel, & Jardin, 2008)

8.3.3 För- och nackdelar

Fördelar med SEPHOS-processen:

- Bulkkemikalier erhålls relativt billigt. Syror ca 3 öre/mol, baser ca 10 öre/mol
- Relativt simpel process med få processteg i jämförelse till PASH-processen
- Tungmetaller separeras med 70-90 %
- Produkt erhålls slutligen som kalciumfosfat och kan säljas direkt som gödningsmedel

Nackdelar med SEPHOS-processen:

- SEPHOS-produkten utvinns som aluminiumfosfat och bör inte användas som gödselmedel då aluminium kan orsaka skada på växters rötter. SEPHOS-produkten genomgår därför *”Advanced SEHPOS-process”* och bildar kalciumfosfater
- Skapandet av ett processvatten som måste genomgå neutralisering och vattenrening. Dock är processvattnet ett oundvikligt avfall hos alla de våtkemiska metoderna.
- Processen är under utveckling och finns inte kommersialiserad vilket kan orsaka driftproblem i ett inledande skede

8.3.4 Kostnader

Processen finns inte att tillgå för kommersiellt bruk och uppgifter om uppskattade investeringskostnader finns inte att tillgå. Däremot uppskattas kemikaliekostnaden för processen vara 2-3 gånger större än kostnaden för utvunna råfosfater. Kemikaliekostnaden kan minskas genom att optimera eluering- och utfällningssteget (Schaum, Cornel, & Jardin, 2008).

8.4 SESAL-Phos Processen

8.4.1 Processbeskrivning

SESAL-Phos (Sequential elution of Phosphorus and Aluminium from sewage sludge ash) är en våtkemisk lakningsmetod uppbyggd i sex processteg. Processens huvudsyfte är att bilda och avskilja

kalciumfosfat till användning som gödningsmedel och aluminium för återanvändande som fällningskemikalie i vattenreningsverk. För att erhålla god verkningsgrad, fungerar den här processen bäst för aska innehållandes mycket aluminium då processtegens syfte är att bilda respektive lösa upp av aluminiumfosfatföreningar för att slutligen erhålla kalciumfosfater.

Steg 1 – Upplösning med saltsyra

I det första steget, försteget, tillsätts saltsyra för att sänka pH till 3 och därmed lösa upp kalcium-, magnesium- och aluminium-fosforföreningar. Aluminiumet kommer från zeoliter som skadats av hydrotermiska synteser med högt ångtryck eller fällningskemikalier från tidigare vattenreningsmetoder. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012) (R E Hester, 2013)

Steg 2 – Separation av surt lakvatten

I det här steget tvingas en utfällning av aluminiumfosfater fram genom att selektivt sänka pH till 3. Kalciumföreningar tillsammans med andra kemiska föreningar i askan separeras i ett separationssteg för surt lakvatten. Syftet med upplösningssteget och separationssteget i ett initialt skede är att urskilja fosforn ur askan medan oupplöst substrat tillsammans med restaska lakas ut (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012).

Steg 3 – Upplösning med natriumhydroxid

Efter att erhållit ett substrat där fosfor selektivt har fällts ut och bildat aluminiumfosfater kan dessa föreningar lösas upp genom att tillsätta natriumhydroxid och därmed höja alkaliniteten till ett pH av 13. Återigen för att höja koncentrationen av fosfor och utvinna denne selektivt. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012).

Steg 4 – Separation av basiskt lakvatten

I det här steget sker en upplösning av aluminium och fosfor. Basiskt lakvatten tillsammans med medföljande oupplöst substrat separeras vilket innebär att koncentrationen av fosfor ökar (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012).

Steg 5 – Bildandet av kalciumfosfater

Den upplösta fosforn tillsammans med aluminiumet förs vidare till en omrörningsreaktor där kalciumklorid tillsätts. I det här steget är syftet att fälla ut kalciumfosfater medan aluminium fortfarande hålls upplöst då aluminium tenderar att lösas upp i likväl sur som basisk miljö, se **Figur 6B** (R E Hester, 2013).

Steg 6 – Separation av kalciumfosfater och aluminium

I det sista steget separeras kalciumfosfater och upplöst aluminium. Aluminiumet kan återanvändas och återföras till vattenreningsanläggningar som utfällningskemikalie. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012) (R E Hester, 2013).

SESAL-Phos processen är till synes olik SEPHOS-processen men innebörden är den samma. SESAL-Phos kräver en mindre mängd tillsatskemikalier, syra och bas. SEPHOS- likväl som SESAL-Phos processen är passande till aska innehållandes större mängder aluminium. Utvinningsgraden för fosfor kan uppnå 78 % om metoden är applicerad till en aluminiumrik aska. Används järn-föreningar som

utfällningskemikalie i reningsverken erhålls slutligen en lägre aluminiumhalt i askan vilket endast ger en utvinningsgrad på 50 % fosfor. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012)

Figur 10 visar SESAL-Phos processens olika delsteg. Processen är en sex-stegs-process som involverar olika steg för kemikalietillsatser så som HCl, NaOH, $CaCl_2$ och separationssteg för oupplöst substrat.

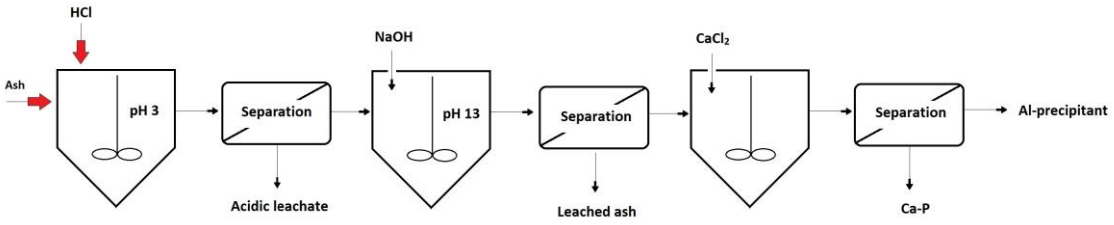

Figure 10. SESAL-Phos process scheme with six different solution and separation steps.

SESAL-Phos processen bygger på en förflyttning av fosfor mellan aluminiumfosfater och kalciumfosfater. Detta uppnås genom tillsats av aluminiumhydroxid. Kalcium och aluminiumjoner frigörs samtidigt som fosforsyra bildas. I ett nästkommande steg sker tillsatsen av aluminiumhydroxid vilket ger upphov till att aluminiumjoner frisätts. Därefter är syftet att de frigjorda aluminiumjonerna ska bilda aluminiumfosfat. Syftet med att bilda aluminiumfosfat är att övrigt substrat kan separeras samtidigt som fosfor är inbundet i en förening som kan passera separationssteget utan att avskiljas. För att bilda en växttillgänglig produkt löses sedan aluminiumfosfatet upp och kalciumjoner tillsätts för att bilda kalciumfosfater som slutgiltig produkt. Restsyra från processen kan återanvändas och aluminiumblandningen kan återföras till vattenreningsverk. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012)

8.4.2 För- och nackdelar

Resultat från ett laboratorieförsök visade att mängden syra som krävdes var 2,1 respektive 2,2 mol H^+/mol återvunnen fosfor vilket är en betydligt mindre mängd än vad som används i SEPHOS-processens laboratorieförsök som uppgick till 6,5 respektive 4,4 mol H^+/mol återvunnen fosfor. Resultatet från laboratorieförsöken visade även att mängden bas (NaOH) som krävs till processen uppgår till 4,46 respektive 4,10 mol OH^-/mol återvunnen fosfor. (Petzet, Peplinski, & Cornel, 2012)

Fördelar med SESAL-Phos processen:

- SESAL-Phos processen kräver mindre mängder tillsatskemikalier i jämförelse med SEPHOS-processen.
- Produkt erhålls slutligen som kalciumfosfat vilket kan säljas direkt som gödningsmedel
- Aluminiumet kan återanvändas som fällningskemikalie hos vattenreningsanläggningar

Nackdelar med SESAL-Phos processen:

- Processen är under utveckling och finns inte kommersialiserad
- Skapandet av ett processvatten som måste genomgå neutralisering och vattenrening. Dock är processvattnet ett oundvikligt avfall hos alla de våtkemiska metoderna.
- Uppgifter om tungmetallutvinning saknas

8.4.3 Kostnader

Processen är under utveckling och finns inte att tillgå för kommersiellt användande. Enligt Svenska miljöskyddsinstitutet kan kostnaden för återvunnen fosfor med SESAL-Phos processen uppgå till ca 65-78kr/kg återvunnen fosfor (Baresel, o.a., 2014). Investering- och driftkostnader finns inte att tillgå för processen.

8.5 BioCon-Processen

8.5.1 Processbeskrivning

BioCon är en våtkemisk lakningsmetod där aska från förbränning av rötslam surgörs och löses upp med svavelsyra för att bilda en lakningslösning. I BioCon-processen sker fosforåtervinning ur askan genom jonbyte. Jonbytestekniken är en lämplig metod för att separera fosfor från bl.a. järn och andra metaller i förbränningsaskan.

För att BioCon-processen, utifrån ett tekniskt och ekonomiskt perspektiv, ska fungera, krävs det att slammet torkas i en bandpress för att underlätta pumpning innan förbränning för att erhålla lämplig fukthalt. Väl efter förbränning mals askan ner i ett mer lätthanterligt material för att slutligen lösas upp och genomgå jonbytesprocessen. (Hasselström, 2000) (Levlin, 2012).

Processen i helhet:

- Steg 1 - Förbehandlingssteg med torkning av slam
- Steg 2 - Förbränning av slam följt av askmalning
- Steg 3- Återvinning av fosfor ur aska genom en fyrastegsprocess av jonbyte

När askan och slagget pulveriserats förs pulvret vidare till en upplösningstank där svavelsyra och vatten tillsätts. Uppehållstiden i upplösningstanken är ca 1 timme för att uppnå tillräckligt hög upplösningsgrad. Här omvandlas pyrofosfat till ortofosfat vilket anses mer fördelaktigt vid fosforåtervinning. Resterande oorganiskt material sedimenteras ut som sand. Återstoden pumpas vidare från upplösningstanken till jonbytarprocessen där respektive komponenter utvinns, se **Figur 12** (Hasselström, 2000).

Steg 1 – Katjonbyte

I det första steget förs lakningslösningen in i en katjonbytare där Fe^{3+}-joner separeras från de sura eluatet. Första jonbytarsteget regenereras med svavelsyra och bildar järnsulfat ($Fe_2(SO_4)_3$) som separeras från processen (R E Hester, 2013).

Steg 2 – Anjonbyte

Från första katjonbytarsteget går H^+, H_3PO_4 och HSO_4^- in i nästkommande anjonbytare där HSO_4^- separeras. Steg 2 regenereras med kaliumklorid, vilket bildar kaliumvätesulfat ($KHSO_4$). H^+, H_2SO_4, Cl^- samt SO_4^{2-} förs vidare till ett tredje jonbytarsteg (R E Hester, 2013).

Steg 3 – Anjonbyte

Likväl steg 2 används en anjonbytare för att eliminera $H_2PO_4^-$. Jonbytaren regenereras med saltsyra och bildar fosforsyra (H_3PO_4) (R E Hester, 2013). Fosforsyra är produktklassificerad, och kan säljas

direkt till industrin som tillsatskemikalie för olika kemiska processer. En alternativ metod är att vidare behandla fosforsyran och producera kalciumfosfater för gödningsmedelproduktion.

Steg 4 – Katjonbyte

Slutligen följer H^+, Cl^- och SO_4^{2-} till ett slutgiltigt katjonbytarsteg där metalljoner tas bort och jonbytaren regenereras även här med saltsyra vilket ger metallkloridföreningar tillsammans med ett överskott av syra (R E Hester, 2013).

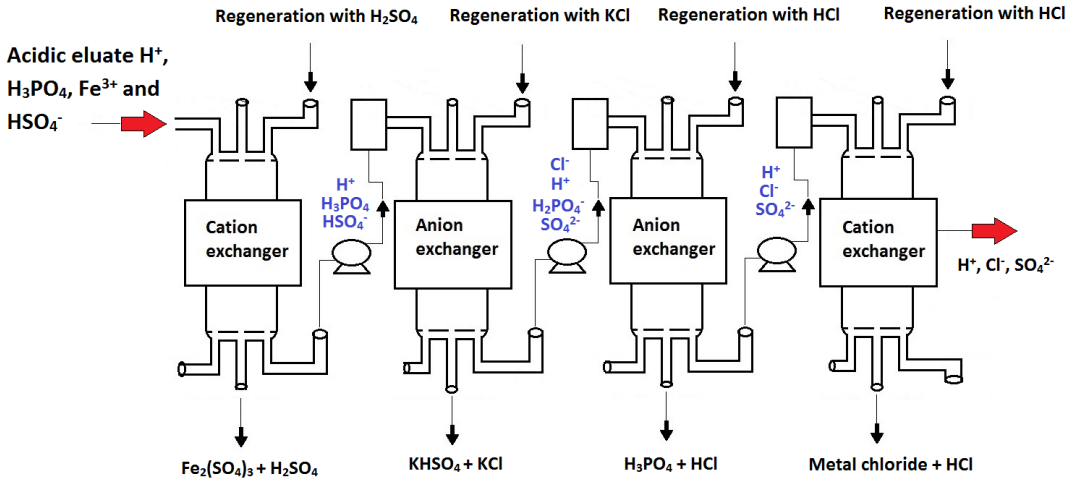

Figure 11. Ion exchange part of the BioCon-process.

Figur 11 visar integreringen av jonbytare i BioCon-processen, vilka kemikalier som används för regenerering samt vilken produkt som erhålls efter eluering. (R E Hester, 2013)

Anledningen till att syra tillsätts är att lösliggöra fosfor. Syra är också nödvändigt att tillsätta för att regenerera jonbytarna. Regenerationslösningen ska adderas efter att ingående ström passerat. Ytterligare ett utfällningssteg krävs för att separera produkten och lösningen innehållande de regenererade substratet. Exempelvis för upplösning av järnfosfater krävs tillsats av saltsyra så att järnjoner (Fe^{3+}) kan separeras från den sura lösningen i katjonbytaren. Upplösning av kloridjoner sker i anjonbytaren. (R E Hester, 2013)

8.5.2 Tidigare erfarenheter

BioCon-Processen används i Brønderslev, Danmark i piloskala. Anläggningen har biologisk fosforavskiljning vilket producerar ett slagg bestående av järn, 200 mol/ton TS. Slagget förbränns och fosfor utvinns ur askan. I början av 2000-talet projekterades BioCon-processen för en anläggning i Falun. BioCon-företaget blev uppköpt av Krüger som sedan avböjt åtagandet och anläggningen uppfördes aldrig. Processen finns inte att tillgå i Sverige. (Balmér, o.a., 2002) (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009)

8.5.3 För- och nackdelar

BioCon-processen kräver tillsatskemikalier i stor mängd. Kemikalier som utvinns vid varje steg i jonbytarna kan säljas som produkt alternativt återanvändas. Restsyra kan återcirkuleras och användas som regenerationslösning för jonbytarna.

Fördelar med processen:

- Huvudprodukt utvinns som fosforsyra som är produktklassificerad. Fosforsyra kan ytterligare förädlas för att bilda kalciumfosfater till gödningsmedelsindustrin
- Större mängden restsyra kan återanvändas för regeneration av jonbytare
- Processen är konstruktionsmässigt sett enklare i jämförelse med andra våtkemiska återvinningsprocesser

Nackdelar med processen:

- Risk för att jonbytesmassan kan skadas eller spolas ut vid backspolning
- Stor mängd kemikaliehantering, kräver lagringsutrymme av syra och bas
- Ingen separation av tungmetaller
- Processen finns inte längre att tillgå för kommersiellt bruk

BioCon-processen finns upprätthållen på vissa anläggningar, bl.a. i Danmark. Processen är i dagens läge inte tillgänglig i Sverige och är sedan en tid tillbaka nerlagd.

8.5.4 Kostnader

Processen har beprövats huvudsak i pilotskala och delvis i kommersiellt, vilket gör att kostnaderna för jonbytestekniken är osäker. (Baresel, o.a., 2014). BioCon-processens jonbytesteknik har en uppskattad kapitalkostnad på 820 kr/ton TS slam och en driftkostnad på 625 kr/ton TS. (Nieminen, 2010)

Kemikalieförbrukningen för processen beräknat på kg/ton slam uppgår till 100 kg svavelsyra, 30 kg saltsyra, 5 kg natriumhydroxid, 5 kg magnesiumoxid. (Tideström, Alvin, Jennische, & Hultman, 2009). BioCon-processen finns inte längre att tillgå för kommersiellt bruk i Sverige.

8.6 Fosforutvinningsmetoder under utveckling

Följande fosforutvinningsmetoder befinner sig i ett utvecklingsstadium alternativt beprövat i laborativskala och är långt ifrån en kommersiell mognad.

8.6.1 MEPHREC-Processen

MEPHREC är en termokemisk behandlingsprocess av avloppsslam där förbränningen sker vid 1450-2000 ^{0}C vilket leder till att majoriteten alla tungmetaller förångas (Hg, Cd, Pb, Zn) eller övergår till vätskefas (Fe, Cu, Cr, Ni) utan tillsatser av kloridföreningar. Fosforn förblir inert vid förbränningen och stannar kvar i den nu slaggbildande askan. (Baresel, o.a., 2014). Fosforslagget tappas ut under processen vid 1450 ^{0}C för att inte beblandas med flytande tungmetallerna.

Den slutgiltiga produkten innehåller ca 4,6 - 12 % P_2O_5 med möjlighet till 90 % löslighet i citronsyra. Processen har utformats i pilotskala med en kapacitet på 8 ton briketter/timme. För kommersiellt bruk bör processens kapacitet erhålla ett minimum av 40 000 ton briketter/år enligt företaget Ingitec. (Nieminen, 2010)

8.6.2 RecoPhos

RechPhos (*Recovery of Phosphorus from Sewage Sludge and Sewage Sludge Ashes with ThermoreductiveRecoPhos Process)* är en termokemisk fosforåtervinningsmetod i pågående utveckling i ett forskningsprojekt som genomförs inom EU:s sjunde ramprogram. Projektet beräknas

ha sitt slut under början av 2015 med syfte att utveckla en hållbar och effektiv process för fosforåtervinning ur aska från avloppsslam. Processen genomförs termokemiskt där fosfater och tungmetaller utvinns ur aska som utsatts för hög temperatur. Fosforutvinningen sker då fosfor samlats på en tunn film och kan avdunsta från filmen utan att reagera med andra ämnen. Produkten utvinns som vit fosfor eller genomgår oxidation för bildandet av fosforsyra. (Baresel, o.a., 2014)

Under RecoPhos-projektet ska laboratorieförsök, modellering och simulering av en anläggning utföras vilket ska ger en grund till vidare utveckling av ett bänkskaleförsök och slutligen en pilotanläggning. (Baresel, o.a., 2014)

8.6.3 Bioleaching

Bioleaching är en extraktionsmetod där bakterier extraherar fosfor ur aska efter förbränning. Bakterierna är oxiderande och bildar syra. Syran lakar ut fosfor och metaller ur askan. Delar av fosforn konsumeras av bakterierna, vilket gör att bakterierna avskiljs som biomassa med högt fosforinnehåll. (Baresel, o.a., 2014)

Tekniken har beprövats i laboratorieskala med goda extraktionsresultat. Bakterierna spenderade 11 dagar I reaktorn för att erhålla en fullständig fosforextraktion vilket kan leda till problem vid uppskalning av tekniken eftersom processen hindras från kontinuitet. Produkten som erhålls är biomassa med högt fosforinnehåll. (Kalmykova & Fedje, 2012)

8.6.4 Elektrodialytisk process

Elektrodialytiska processen (ED) utvecklades på det tekniska universitetet i Danmark, 1992. Tekniken går ut på att utsätta porösa material så som aska för likström. I ED används stationära celler med omrörning. Omrörare krävs för att förhindra att volymen och även massan sjunker i de stationära cellerna på grund av lättlösliga partiklar. Processen förlitar sig på att elektriska strömmar påverkar elektronöverföringen mellan involverade molekyler vid elektroden. (Guedes, Nazaré Couto, & Ribeiro, 2014)

Under ED-processen befinner sig fosforn som negativa ortofosfater. Ortofosfaterna och andra negativt laddade molekyler kan extraheras ur askan genom att den elektiska strömmen påverkar laddningarna hos molekylerna och möjliggör en förflyttning av molekyler mot anoden och katoden. Processen befinner sig på laboratorieskala och den undersöks i hopp om att erhålla en god avskiljningsgrad av fosforföreningar samtidigt som tungmetaller kan separeras ur askan. (Guedes, Nazaré Couto, & Ribeiro, 2014)

8.6.5 LeachPhos

LeachPhos är en fosforåtervinningsmetod som beprövats i industriell skala 2012 i Bern och är baserad på tekniken från FLUWA-processen, en teknik som behandlar flygaska efter förbränning av kommunalt avfall. Processen behandlar flygaska i syftet att separera tungmetaller från askan och återvinna växttillgängligt fosfor. Tekniken genomgår utveckling för att kunna behandla rötslam. Tester har gjorts där 300-400 kg/h rötslam genomgick processen och ca 80 % av innehållande fosfor lyckades utvinnas. Industrialiseringen av LeachPhos pågår och processen kan inom snar framtid vara demonstrerad (Adam, o.a., 2015).

9. Kostnader för fosforutvinning

Kostnaderna för utvinning- och återvinning av fosfor baseras på vilken kemisk utvinningsmetod som används samt åtgången av förbrukningsprodukter. I följande avsnitt beskrivs kostnaderna för bulkkemikalier och försäljningspris för producerat växttillgängligt fosfor i olika former.

9.1 Kemikaliekostnader

Urlaknings- och kemiska fällningsprocesser kräver kemikalietillsatser. I de flesta våtkemiska processerna som presenterats användes bulkkemikalier så som saltsyra, svavelsyra, kaliumklorid och natriumhydroxid.

Kostnaderna för respektive kemikalier varierar med efterfrågan. Generellt för bulkkemikalier är att de produceras i stor mängd och att kostnaden därmed infinner sig som låg. Kostnaden för natriumhydroxid är högre än för saltsyra vilket medför att lakning med bas är dyrare än lakning med syra. (Baresel, o.a., 2014). Priset för svavelsyra och saltsyra är ca 3 öre/mol och 10 öre/mol för natriumhydroxid. 98 % -ig svavelsyra kan införskaffas för samma pris som 33 % -ig saltsyra (Baresel, o.a., 2014).

9.1.1 Produktutfall från fosforåtervinning

Fosforåtervinningsprocesserna har olika produktutfall. De kemiska föreningarna som kan identifieras som produkter är:

- Fosforsyra
- Ammoniumfosfat
- Kalciumfosfat
- Aluminiumfosfat

Icke produktklassificerade utfall:

- Whitlockit ($CaKMg(PO_4)_7$)
- Natriumkalciumfosfat

Fosforsyra är en produkt med högre förädlingsvärde än kalciumfosfat och används inom fosfatindustrin som råvara till olika kemiska processer. Ammoniumfosfat är mer lättillgängligt och kan vid akut fosforbrist användas som gödselmedel. För att sprida ammoniumfosfat på åkermark krävs det en spridningsanordning alternativt att den löses upp med vatten till så kallat flytgödsel som underlättar spridning. Kalciumfosfater är relativt svårlösliga och kan vara ineffektiva som tillförsel på åkermark. Däremot kan kalciumfosfater användas som lämplig ersättning för råfosfater i industrin med ett stort kommersiellt värde (Baresel, o.a., 2014).

Aluminiumfosfat bildas i SEPHOS-processen. Den här produkten är inte tillämpad att användas som gödningsmedel då aluminium kan medföra skador på växternas rötter. Därför utvecklas den *Avancerade SEPHOS-processen* för att istället utvinna kalciumfosfater.

Whitlockit återfinns i askan från termokemiska behandlingen i BFB-panna och är växttillgängligt. Med additiv av K_2CO_2 och $CaCO_2$ kan askgranuler bildas och användas som gödningsmedel. Eftersom processen är i ett tidigt stadie är askgranulerna är inte produktklassificerade ännu.

Natriumkalciumfosfater från ASH DEC-processen har liknande egenskaper och är växttillgänglig, dock inte produktklassificerad utan är en mellanprodukt. Däremot är det möjligt att addera primära och sekundära tillskott av näringsämnen och kompaktera produkten till askgranuler (Outotec, 2014). Kalciumklorid eller kalciumfosfat kan tillsättas för att bilda *PhosKraft PK Fertilizer,* en askgranul innehållandes fosfor och kalcium som kan säljas som gödningsmedel.

9.2 Transportkostnader

Är rötslam och rötrest ett tänkbart alternativ för förbränning kräver också substraten transporter till anläggningar där förbränningen kommer att ske. Rötrester finns i lager hos en del anläggningar, bl.a. Högdalenverket. Rötslammet däremot, måste transporteras från vattenreningsverken till förbränningsanläggningen.

Transportkostnaden för 25 % TS-halt avvattnat slam uppskattas bli 140 kr/mil med antagande att ett maximalt transportavstånd inte överskrider 20 mil, transportmängden uppgår till 35 ton/lastbil. Transportkostnaden för avvattnat slam kan uppskattas bli 8-13 kr/tonmil. (Lundh & Kjellström, 2014)

10. Miljövinster, risker och förluster

Vid förbränning av rötslam och rötrest är det många faktorer som påverkas. Rötslammet och rötresten kan vid förbränning anses som en resurs eftersom förbränningsprocessen producerar värme vilket kan anslutas till ett fjärrvärmenät. Förbränning medför en reduktion av avfallsvolymer vilket gör samhället en tjänst. Utöver energiutvinning och reducerade avfallsvolymer så finns goda möjligheter till förbränning av rötslam och rötrest i Stockholmsområdet eftersom förbränningsanläggningar är placerade i utkanten av staden vilket minimerar långa transportsträckor.

Arbetsmiljön vid hantering av rötslam och rötrest påverkas minimalt, eventuell bildning av damm av torkat slam bör beaktas och ostabiliserat slam kan avge viss lukt (Svenskt Vatten, 2013).

Slamspridning på åkermark innebär att näringsämnen så som fosfor, kväve och mullämnen återförs. Däremot innebär det en risk vid spridning då oönskade ämnen så som tungmetaller, smittoämnen och läkemedelsrester tillförs livsmedelskedjan. Förbränns rötslammet förstörs de skadliga ämnen som medföljer avloppsvattnet. Avsätts rötslammet som täckning på avslutade deponier minskar risken för inblandning av farliga ämnen i livsmedelskedjan, däremot sker ingen näringsåterföring (Linda Bäfver, 2013). Fosfor kommer i framtiden att bli en bristvara och återvinningsprocesser av fosfor ur förbränningsaska kan i framtiden bidra till ett hållbart återförande av näringsämnet.

Ur ett ekonomiskt perspektiv är återvinning av fosfor ur förbränningsaska från rötslam och rötrest i dagens läge ett problem. Eftersom teknikerna för återvinning av fosfor är så pass dyrbara finns det endast utrymme för företagsintressenter att utvärdera metoder och tekniker och planera samt skapa beredskap för en framtida investering av fosforåtervinningstekniker. Behovet av att återvinna och återföra fosfor från avfall kommer att i framtiden öka eftersom fosforreserverna sinar. Större fosforbrytarnationer, USA och Kina beräknas ha ca 40-50 år kvar av råfosfater. (Finnson, M140, 2015).

Eftersom Fortum Värme bedriver förbränningsverksamhet finns det stor potential att tillämpa fosforutvinningstekniker i framtiden som uppnått en kommersiell mognad. De flesta teknikerna för

återvinning är under utveckling vilket också bidrar till en del osäkerheter så som driftproblem, teknisk komplexitet och andra faktorer som gör att processernas drift kan antas vara osäker. I en framtid där tekniker för fosforåtervinning utvecklats och effektiviserats är möjligheten stor för att företag ska anse metoderna som ekonomiskt hållbara. Tillsvidare gäller det att bredda kunskapsområdet kring fosforåtervinning och skapa en beredskap för implementering i framtiden.

10.1 EU:s avfallshierarki

EU:s avfallshierarki påvisar en rangordning, där man i första hand ska förebygga att avfall uppstår, i andra hand återanvända och i tredje hand återvinna. Är dessa steg inte möjligt ska avfallet omhändertags på ett säkert sätt.

Figur 12. EU waste hierarchy from Recyctec (Recyctec, 2015).

Fortum Värme befinner sig redan högt upp i avfallshierarkin på flera fronter då de både återanvänder avfall och förebygger uppkomst. Vid en eventuell förbränning av rötslam och rötrest skulle man befinna sig på steg 2 i avfallstrappan eftersom man utnyttjar ett avfall samtidigt som utvinning av energi sker. **Figur 12** visar EU:s avfallshierarki. (Recyctec, 2015)

11. Resultat

Rapporten har presenterat olika fosforåtervinningsmetoder, termo- och våtkemiska processer. De återvinnings- och dekontamineringsprocesser som är mest lovande är ASH-DEC-processen och CleanMAP-teknologin. Även termokemisk behandling av aska i BFB-panna och PASH-processen har potential men är i ett utvecklingsstadium.

ASH DEC-processen är en dekontamineringsprocess där askan efter förbränning genomgår ytterligare termisk behandling för att separera tungmetaller och växttillgängligt fosfor i askan. Tekniken finns i kommersiellt bruk i Tyskland och som pilotanläggning i Österrike. Den uppskattade investeringskostnaden för ASH DEC-processen är 140-170 Mkr med en återbetalningstid på ca 4 år. Produkten blir en mellanprodukt i form av natriumkalciumfosfat som efter vidarebehandling med kalciumklorid eller kalciumsulfat ger askgranuler och produkten *PhosKraft PK Fertilizer* som kan säljas i form av askgranuler som gödningsmedel.

CleanMAP-teknologin är i ännu inte demonstrerad i fullskala. Däremot pågår en förprojektering av en anläggning som ska kunna behandla 10 000 – 30 000 ton aska/år, vilket motsvarar ca 30 % av Sveriges avloppsslam. Anläggningen beräknas behandla ca 4 ton aska/h. I processen separeras en sandfraktion på 50 % från ingående aska tillsammans med gips. Metallfraktioner som aluminium separeras med 60-80 % och järn med 10-20 %. Tungmetaller separeras och erhålls i fast fraktion. Bildad produkt i processen är ammonium- eller kalciumfosfater som är produktklassificerade och kan säljas direkt som gödningsmedel.

Den termokemiska behandlingen av aska i BFB-panna är långt ifrån kommersiell och befinner sig på lab-/bänkskala. Metoden är tillsynes effektiv då förbränning- och fosforutvinningsförsöken visat ge en god separation av tungmetaller och fosfor erhålls i växttillgänglig form i bottenaskan som whitlockit. Den termiska behandlingen i BFB-panna med en kapacitet på minst 25 000 ton aska, beräknas ha en framställningskostnad på 22 kr/kg producerad fosfor och en uppskattad investeringskostnad på 72 Mkr med en annuitetsfaktor på 17,7 % och en återbetalningstid på 4,4 år. Bildad produkt erhålls som växttillgängliga askgranuler men är inte produktklassificerad.

PASH-processen är utvecklad av *Institute of Applied Science (IAP)* i Tyskland men är fortfarande under utveckling i pilotskala. Processen producerar kalciumfosfater samtidigt som tungmetaller separeras till 99 %. Kalciumfosfater kan säljas som gödningsmedel. PASH-processen uppskattas ha, enligt en demonstrationsanläggning i Tyskland, en investeringskostnad på 46 Mkr, driftskostnad på 37 Mkr, med en kapacitet på 30 000 ton/aska, år och en återvinningskapacitet på 1 700 ton fosfor/år.

SEPHOS-processen är våtkemisk process under utveckling och finns inte att tillgå för kommersiellt bruk. Processen beräknas ha en stor åtgång av kemikalieförbrukning och kemikaliekostnaden uppskattas vara 2-3 gånger större än kostnaden för utvunna råfosfater hos gruvindustrin. Processen avskiljer tungmetaller genom upplösning med syra och bas och har relativt få antal processteg jämfört med PASH-processen. Slutgiltig produkt är kalciumfosfat vilket kan säljas som gödningsmedel.

SESAL-Phos processen är våtkemisk och under utveckling och finns inte att tillgå för kommersiellt bruk. Produkten framställs även här som kalciumfosfater som kan säljas som gödningsmedel. Aluminiumet som separeras i processen kan återanvändas som fällningskemikalie hos vattenreningsanläggningar.

BioCon-processen är en våtkemisk teknik med fyra jonbytarsteg där produkten blir fosforsyra. För vidare behandling kan fosforsyran fällas ut med kalciumjoner varvid kalciumfosfater erhålls. Tekniken är demonstrerad i Brønderslev, Danmark och det har funnits en anläggning i Falun, Sverige, men är numera nerlagd på grund av driftproblem.

Fortum Värme har avfallseldade rosterpanna och CFB-pannor där verksamhetsavfall och biobränslen används som bränslen. Bottenaska/slagg från avfallspannorna kyls med vatten vid utmatningen varvid askklumpar bildas som kan vara svårupplösliga för processer som använder syra eller bas för upplösning. CFB-pannorna har torrutmatning av bottenaska och bildar mer flygaska, anses vara med lämpad åt de våtkemiska processerna.

Samförbränning av rötslam/rötrest med biobränsle är att föredra ur ett ekonomiskt perspektiv eftersom investering av en särskild panna för mono-förbränning av slammet kan undvikas.

Biobränslet har en låg askhalt vilket gör att koncentrationen av fosfor i askan ökar och därmed blir så pass hög att det finns möjlighet att återvinna den. Det är en fördel om biobränslet har en låg fukthalt. Då finns förutsättningar att blanda in större mängd slam med hög fukthalt, kring 75 %, och få en brännbar bränsleblandning.

Kostnaden för att återvinna fosfor ur aska ligger ungefär på 28-38kr/kg, beroende på vilken metod som används. I dagsläget är försäljningspriset på fosfor ca 3 kr/kg.

12. Diskussion

Att återföra fosfor från avlopp till åkermark är viktigt ur ett hållbart perspektiv, dels för att minimera risken för övergödning dels att ta tillvara på ett livsviktigt näringsämne vars brytbara reserver tenderar att ta slut. Hur återförandet ska ske är i dagens läge oklart. Oavsett om det är slamspridning på åkermark med hårdare krav på hygienisering eller förbränning av avloppsslam för garanterad destruktion av patogena ämnen är det en fråga om ekonomi. Slamspridning med hygienisering är ett billigare alternativ i jämförelse med förbränning av avloppsslam med efterföljande fosforåtervinning, men ur ett hållbart perspektiv är slamspridning inte ett hållbart sätt att återföra näringsämnen på. Även om rötslammet har genomgått hygienisering och medfört destruktion av patogena ämnen så finns tungmetallerna fortfarande kvar. Vill Sverige fortsätta vara en ledande aktör var det gäller miljövårdnad så krävs det ett säkert och långsiktigt tänkande om hur återförandet av resurssnåla näringsämnen ska ske i framtiden.

Fosforåtervinningsmetoderna har implementerade tungmetallavskiljningstekniker som bidrar till ”*En giftfri miljö”,* som inte hygieniseringen tillför. I slutändan handlar det om vad jordbruket och mänskligheten har för toleransnivå på hanterade avfallsmängderna och halten tungmetaller på åkermarker samt att fosfor i framtiden kommer att bli en bristvara.

Förbränning av rötslam pågår inte i Sverige idag. Men för att utveckla ett intresse för fosforåtervinning skulle det därför vara möjligt att importera aska från länder i Europa där bl.a. monoförbränning av rötslam och rötrest redan sker. På så vis kan demonstrationsanläggningar för fosforåtervinning implementeras. Det är i längden inte en hållbar lösning att importera aska, men det kan vara nödvändigt i ett initialt skede för att få igång medvetenheten och teknikutvecklingen angående fosforåtervinning.

Huruvida förbränning av rötat avloppsslam eller strängare krav på hygienisering av avloppsslam är ett tillvägagångssätt för behandling är i dagens läge en pågående diskussion. Ett alternativ i ett initialt skede är att erbjuda avloppsreningsverken tjänsten att ta emot mindre mängder av rötat avloppsslam om det inte finns möjlighet att återföra till åkermark.

Fosforutvinning ur förbränningsaska är ur ett hållbart perspektiv både miljömässigt och socialt fördelaktigt. För att även få det ekonomiskt hållbart krävs det att mängden fosfor i askan blir tillräckligt hög så att fosforutvinningsmetoder kan appliceras. Därför är sammansättningen utav bränsleblandningen vid samförbränning en av de viktigaste faktorerna. Ur ett hållbart perspektiv är det lämpligt att se förbränning och efterföljande fosforutvinning ur aska som ett gott alternativ till behandling av ett, till mängden, växande avfall. Både den sociala- och miljömässiga aspekten behandlas då avfallsvolymer reduceras, läkemedelsrester, smittoämnen och andra patogena ämnen destrueras samtidigt som tungmetaller reduceras och fosfor återvinns. Ur ett ekonomiskt perspektiv

är kostnaderna för att återvinna fosfor i dagsläget för höga i jämförelse med vad det kostar att bryta råfosfater.

Det är också viktigt att försäljningspriset på återvunnen fosfor kan konkurrera med dagens brytbara reserver och på så vis skapa en lönsamhet och motivation för företagsintressenter att investera i fosforåtervinningsmetoder.

Termokemisk behandling av avloppsslam i en BFB-panna är en enkel och har till synes låg investeringskostnad. Däremot kan de krävas en investering i en ny förbränningsanläggning om en BFB-panna inte finns tillgänglig, vilket påverkar kostnaden oerhört mycket. Metoden befinner sig i ett tidigt utvecklingsstadium och är långt ifrån kommersiell. Syftet med den här processen i jämförelse med ASH DEC-processen är att kombinera förbränning och bilda fosforrik aska i samma process, till skillnad från ASH DEC-processen som behandlar askan i en ytterligare termisk behandling vilket medför större energiförbrukning och anläggningsvolym. Till skillnad från de termokemiska återvinningsmetoderna är det två stycken våtkemiska metoder till synes effektiva. CleanMAP-teknologin och PASH-processen ger båda klassificerade produkter och erhåller god tungmetallavskiljning. Processerna är mer komplexa än de termokemiska metoderna, vilket bidrar till högre driftkostnader i form av kemikalieförbrukning. Likheten mellan processerna är att fokus ligger på fosforåtervinning likväl reduktion av tungmetaller.

Beroende på vilken toleransnivå av tungmetaller i samhället som är acceptabel så är det inte ekonomiskt hållbart med fosforåtervinning i dagsläget. Tillsvidare gäller det att utvecklingen av fosforåtervinningsmetoder går framåt så att risken för driftproblem minimeras samtidigt som teknikerna effektiviseras vilket kan leda till lägre investerings- och driftkostnader för processerna.

13. Slutsats

Avloppsslam är ett avfall som uppstår i takt med att befolkningsmängden ökar samtidigt som reningsverkens tekniker för vattenrening blir allt mer effektivare, vattnet blir renare, och avfallet blir till mängden större. Rötrest är ett avfall som uppstår bl.a. som matavfall, skörderester och grönmassa efter biogasproduktion och blir till mängden också större då förnyelsebara bränslen blir allt mer attraktivt i ett hållbart samhälle.

REVAQ-certifieringen syftar till ett renare avlopp och en bättre slamhantering. Men det är inte ett argument till att rötslam bör spridas på åkermark. Slamspridning är ekonomiskt attraktivt men det är inte ett hållbart sätt att återföra näringsämnen på. Rötslam och även rötrest innehåller smittoämnen, läkemedelsrester, tungmetaller och andra oönskade ämnen som medför kontaminerad bruksmark vid direkt spridning utan en strängare förbehandlingsmetod. Förbränning av avloppsslam och rötrest är ett bättre alternativ för att behandla den mängd producerat avfall som uppstår. Att utvinna fosfor och möjligen andra näringsämnen samtidigt som destruktion av patogena ämnen och tungmetallreduktion sker är en god miljö- och socialmässig vinst. Framtida regelverk bidrar till att kraven för spridning av avloppsslam och rötrest på åkermark kommer att skärpas. Även de miljömål som regeringen tillsammans med naturvårdsverket tagit fram, är en bidragande faktor till att behandla och återvinna näringsämnen ur avloppsslam och rötrest. Enligt ett etappmål som naturvårdsverket uppsatt bör 40 % av fosfor och 10 % kväve ur avlopp återföras som växtnäring 2018.

Certifiering av rötrest med SPCR 120 innebär att rötresten kan användas som biogödsel. För att rötresten ska få spridas som biogödsel ställs kvalitetskrav och riktvärden för bl.a. tungmetaller.

Rötslam och rötrest bör ha en låg fukthalt. Samförbränning av rötslam och rötrest tillsammans med biobränsle är att föredra rent ekonomiskt eftersom en investering i en mono-förbränningsanläggning enbart för slam kan undvikas. En lämplig bränsleblandning är biobränsle med så låg fukthalt som möjligt tillsammans med avvattnat rötslam eller rötrest.

De olika fosforåtervinningsmetoderna har skilda produktutfall, de lämnar också efter sig någon form av utsläpp/avfall som måste tas om hand. Gemensamt för de termokemiska återvinningsmetoderna är att produkterna är växttillgängligt fosfor inbundet i den producerade askan efter förbränning och rökgaserna måste genomgå rökgasrening innan utsläpp. De våtkemiska återvinningsmetoderna har andra produktutfall och bildar ett processvatten som måste genomgå vattenrening. CleanMAP-teknologin producerar ett produktklassificerat vattenlösligt ammoniumfosfat, tillgängligt för direkt bruk på åkermark. Andra processer så som PASH-, SESAL-Phos och SEHPOS-processen ger produkt i form av kalciumfosfater.

SESAL-Phos processen riktar sig till aluminiumrik aska. Rötrest innehåller generellt inte höga halter av aluminium och i rötslam kan halterna variera beroende på vilken utfällningskemikalie som används vid vattenreningsverken.

BioCon-processen är nerlagd och finns inte att tillgå för kommersiellt bruk i Sverige. Däremot är en utvärdering av processen till nytta eftersom liknande jonbytesteknik delvis används i bl.a. CleanMAP-teknologin.

Ammoniumfosfater som bildas i CleanMAP-teknologin är mer lättillgänglig fosfor då ammonium har en god affinitet till fosfor och binder därför in fosforn snabbt. De bildade kalcium- och ammoniumfosfaterna är lättvittrade produkter och är relativt växttillgängliga men kan vid ett akut fosforbrist anses ha en sämre inverkan då fosforn har en långsam frigörelse från produkterna. Gemensamt för de termo- och våtkemiska återvinningsmetoderna är att fokus på fosforåtervinning är lika högt klassificerat som att tungmetallspridning minskas.

CleanMAP-technology och *ASH DEC-processen* är två processer som anses ha störst potential för Fortum Värme att i framtiden implementera för fosforåtervinning. Motiveringen till valet av CleanMAP-teknologin är att ett befintligt samarbete med Ragnsells, som nu mera äger EasyMining AB, är etablerat. Dels så medför metoden en rad olika fördelar till skillnad från andra fosforåtervinningsmetoder, så som formation av ammoniumfosfat som är produktklassificerad vilket leder till lättare försäljning. Processen är energieffektiv och uppnår hög grad av tungmetallreduktion. *CleanMAP-teknologin* kräver en relativt liten anläggningsyta med ett omhändertagande av 30 000 ton aska/år. För att den här processen ska fungera krävs det att förbränning sker i CFB-panna. En rosterpanna orsakar smälta hos askan och är därför svårupplöslig med syra.

Anledningen till att *ASH DEC-processen* är ett alternativ är att den finns tillgänglig för kommersiellt bruk i Tyskland och Österrike, vilket medför en bredare kunskap inom området för fosforåtervinning. Processen kräver dock större anläggningsyta i jämförelse med *CleanMAP-teknologin. ASH DEC* är en dekontamineringsprocess och producerar en mellanprodukt som finns i form av växttillgänglig aska (natriumkalciumfosfater) och är inte produktklassificerad. Det krävs tillskott av primära- eller sekundära näringsämnen för att kunna använda askgranulerna som gödningsmedel. Den ekonomiska aspekten mellan *CleanMAP* och *ASH DEC* går i dagens läge inte att jämföra då CleanMAP-teknologin inte finns tillgänglig för kommersiellt bruk. Däremot är kapaciteten för omhändertagande lika stor hos både *ASH DEC*- och *CleanMAP-teknologin*, 30 000 ton aska/år. Beroende på hur stor areal det finns att avvara på befintlig anläggning samt vilken typ av kemisk process som anses mest attraktiv kan ett avgörande huruvida den termokemiska återvinningsprocessen, *ASH DEC*, eller den våtkemiska återvinningsprocessen, *CleanMAP-technology* är att föredra.

Kostnaderna för återvinningsprocesserna är idag höga och priset för återvunnen fosfor är lågt i jämförelse med vad det kostar att återvinna fosfor. Det kostar ca 28-38kr/kg för framtagning av återvunnen fosfor, beroende på vilken metod som används. Försäljningspriset för fosfor är ca 3 kr/kg. Däremot kommer brytning av råfosfater med tiden att avta eftersom fosforreserverna börjar ta slut. Det innebär att priserna för brytbar fosfor ökar vilket också leder till att försäljningspriset av återvunnen fosfor ökar.

Ur ett hållbart perspektiv erhålls goda miljö- och sociala vinster eftersom ett avfall i form av rötslam och rötrest används som resurs i en förbränningsprocess för utvinning av ett ändligt näringsämne ur askan samtidigt som reduktion av tungmetaller tillsammans med destruktion av läkemedelsrester, smitto- och patogena ämnen sker. Avfallsvolymer reduceras och ett renare jordbruk erhålls. Den begränsande faktorn är den ekonomiska kostnaden för återvinningsprocesserna, som i dagens läge är väldigt kostsamma, vilket innebär en fråga om huruvida en eventuell investering är aktuell i dagens läge.

Bibliography

Adam, C., Eicher, N., Hermann, L., Herzel, H., Mallon, J., Schaaf, M., & Stemann, J. (2015). *Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency.* Berlin: P-REX.

Balmér, P., Book, K., Hultman, B., Jönsson, H., Kärrman, E., Palm, E. L., . . . Åberg, H. (2002). *System för återanvändning av fosfor ur avlopp.* Stockholm: Naturvårdsverket.

Baresel, C., Tjus, K., Levlin, E., Fortkamp, U., Ek, M., Ljung, E., & Palm, O. (2014). *Metoder för fosforåtervinning ur avsloppsslam.* KTH; IVL Svenska miljöinstitutet; SP-JTI. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet AB.

BASF SE. (den 01 01 2013). *http://www.mining-solutions.basf.com/*. Hämtat från http://www.mining-solutions.basf.com/: http://www.mining-solutions.basf.com/ev/internet/mining-solutions/en/function/conversions:/publish/content/mining-solutions/download-center/technical-data-sheets/pdf/Alamine_336_TI_EVH_0141_e.pdf den 25 04 2015

BIOGAS öst. (2011). *Avsättning för rötrest och rötslam i Biogas Östs region .* Stockholm: InfraBioGas öst.

Bramstorp, A. (2013). *Regelverk som styr användningen av biogödsel.* Malmö: HIR Malmöhus AB.

Cohen, Y. (2007). *Uppsala, Sweden Patentnr 20100068113.*

Commission, E. (2012). *Decree of the Ministry of Agriculture and Forestry.* European Commission .

Enfält, P. (den 04 05 2015). Fosforutvinning med CleanMAP-technology. (M. Jonsson, & E.-K. Lindman, Intervjuare)

Finnson, A. (2014). *Årsrapport Revaq.* Stockholm: Svenskt Vatten.

Finnson, A. (2015). *Frågan som Världen glömde - En rapport om Fosfor.* REVAQ, Svenskt Vatten AB. Stockholm: Svenskt Vatten AB.

Granström, K. M. (2014). *Regler för hantering av rötrest.* Karlstad: Karlstads universietet.

Guedes, P., Nazaré Couto, L. M., & Ribeiro, A. B. (2014). *Phosphorus recovery from sewage sludge ash through and electrodialytic process.* Portugal, Denmark: Elsevier.

Hasselström, J. (2000). *Fosforåtervinning ur slam.* Institutionen för Kemiteknik, Industriellt Miljöskydd KTH. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.

Jouni Havukainen, M. H. (2012). *Feasibility of ASH DEC- process in treating sewage sludge and manure ash in.* Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology.

Kalmykova, Y., & Fedje, K. K. (den 27 04 2012). Phosphorus recovery from municipal solid waste incineration fly ask. *Waste Management, 33*, 1403-1410.

Levlin, E. (2012). *Revocery of phosphate from sewage sludge and separation of metals by ion exchange.* Land and Water resources Engineering, Royal Institute of Technology. Stockholm: Royal Institute of Technology.

Linda Bäfver, C. R. (2013). *Sludge fuel mistures - Combustion and extraction of phosphorus.* Borås: Waste Refinery.

Lindman, E.-K. (den 21 05 2015). Askanalyser. (M. Jonsson, Intervjuare) Stockholm.

Lundh, R., & Kjellström, B. (2014). *Ekonomiska förutsättningar för slamraffinering.* Värmemekanik AB, Exergetics Energisystemteknik AB. Luleå: På uppdrag av LTU, Luleå Tekniska Universitet.

Marcus Öhman, N. S. (2014). *Återvinning av fosfor och energi ur avloppsslam genom termisk behandling av fluidiserad bädd.* Luleå, Umeå: LTU, UmU.

MEAB, Metallextraktion AB. (2009). *Phosphorus recovery from sewage sludge ash.* Askim, Göteborg: MEAB Hydrimetallurgical Process Applications.

Montag, D. (2009). Montag, D. and Pinnekamp, J. 2009. The PASH process for P-recovery and overview of the German Funding Programme "Recycling management of plant nutrients, especially phosphorous". Presentation in BALTIC 21 - Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice, September 28-30, 2009. Berlin. . *ISA and Institute of Environmental Engineering* (s. 21). Berlin: RWTH AACHEN UNIVERSITY.

Naturvårdsverket. (2002). *Aktionsplan för återvinning av fosfor ur avlopp.* Stockholm : Naturvårdsverket, Rapport 5214.

Naturvårdsverket. (2003). *Naturvårdsverkets författningssamling NFS 2003:15.* Stockholm: Naturvårdsverket.

Naturvårdsverket. (2012). *Hållbar återföring av fosfor.* Stockholm: Naturvårdsverket.

Naturvårdsverket. (den 13 02 2013). *Regler för avloppsslam.* Stockholm: Naturvårdsverket. Hämtat från http://www.naturvardsverket.se/: http://www.naturvardsverket.se/Nerladdningssida/?fileType=pdf&downloadUrl=/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/avloppsslam/regler-avloppsslam-20130213.pdf den 15 04 2015

Nieminen, J. (2010). *Phosphorus recovery and recycling from municipal wastwater sludge.* Espoo: Aalto University, School of Science and Tehgnology.

Norin, E. (2007). *Alternativa hygieniseringsmetoder.* Stockholm: Svenskt Gastekniskt Center.

Outotec. (den 01 1 2014). Hämtat från Outotec: http://www.outotec.com/en/Products--services/Energy/Phosphorus-recovery/#tabid-2 den 30 Mars 2015

Patrik Enfält. (2014). *Näringsämnen och kretslopp - metoder för fosforutvinning ur askor.* Uppsala: EasyMining.

Persson, P. O. (2005). *Miljöskyddsteknik Strategier & teknik för ett hållbart miljöskydd* (Vol. 7). Stockholm, Sweden: Industriell Ekologi.

Petzet, S., Peplinski, B., & Cornel, P. (2012). *On wet chemical phosphorus recovery from sewage ash by acidic or alkaline leaching and an optimization combination of both.* Institut Iwar, BAM Federal Institute of Materials Reasearch and Testing. Berlin: Water Research.

P-rex. (den 01 02 2015). *Technical Factsheet.* Hämtat från http://p-rex.eu/: http://p-rex.eu/uploads/media/PREX_Factsheet_ASHDEC.pdf den 08 04 2015

R E Hester, R. M. (2013). *Waste as a resource* (Vol. 37). (R. M. Ronald E Hester, Red.) United Kingdom: RSC Publishing.

Recyctec. (den 01 01 2015). *www.recyctec.se*. (R. H. AB, Producent, & Recyctec Holding AB) Hämtat från http://recyctec.se/sv/Eus-avfallshierarki: http://recyctec.se/sv/Eus-avfallshierarki den 15 04 2015

Sartorius, C. (2011). *Lead market potential for phosphorus recycling technologies in Germany.* Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI.

Schaum, C., Cornel, P., & Jardin, N. (2008). *Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Ash - A wet chemical Approach.* Technische Universität Darmstadt, Institut WAR, Wastewater Technology, Petersenstraße 13, D-64287 Darmstadt, Germany, Ruhrverband, Kronprinzenstraße 37, D-45128 Essen, Germany. Ruhverband: Technische Universität Darmstadt.

Skoglund, N., Boström, D., Grimm, A., & Öhman, M. (2012). *Återvinning av fosfor och energi ur avloppsslam genom termisk behandling i fluidiserad bädd.* Svenskt Vatten Utveckling, Svenskt Vatten Utveckling. Stockholm: Svenskt Vatten Utveckling (SVU).

SLU. (2013). *Rötrest från biogasanläggningar.* Uppsala: SLU.

SLU, R. A., KSLA, Å. B., Göte Bertilsson GreenGard, J. F., SLU, H. K., Vara, C.-J. L., Tagelberg, P.-Å. S., . . . Vallåkgra, L. T. (2013). *Sammanfattning av KSLAs fyra workshops samt slamstrategiscenarier.* KSLA Arbetsgrupp.

Statens energimyndighet. (2013). *Produktion och användning av biogas och rötrester år 2013.* Stockholm: Energigas Sverige.

Statens jordbruksverk. (2009). *SJVFS 2009:6 Saknr 14.* Stockholm: Statens Jordbruksverk.

Stockholm Vatten. (2013). *Slamstrategi för Stockholm Vatten.* Stockholm: Stockholm Vatten.

Svenskt Vatten. (2013). *Slamhantering och strategier för slamanvändning.* Stockholm: Svenskt Vatten AB.

Tideström, H. (den 01 05 2008). *svensktvatten.se.* Hämtat från http://www.svensktvatten.se/: http://www.svensktvatten.se/Vattentjanster/Avlopp-och-Miljo/Slam-och-slamhantering/Lagar-och-regler/ den 15 04 2015

Tideström, H. (2012). *Teknik för fosforåtervinning ur avlopp.* KSLA:s Workshop . Stockholm: TÝRENS.

Tideström, H., Alvin, L., Jennische, U., & Hultman, B. (2009). *Fosforutvinning ur avloppsslam.* SWECO Environment AB. Stockholm: SWECO.

Öhman, M. (den 04 05 2015). Fosforåtervinning genom termokemisk behandling av avloppsslam i en BFB-panna. (M. Jonsson, & E.-K. Lindman, Intervjuare)

Bilaga 1. Kostnadsexempel över fosforåtervinning i termokemiskbehandling av avloppsslam i en BFB-panna

Table A. Estimated profitability calculations over thermo chemical treatment in a BFB-reactor. (Marcus Öhman, 2014)

Kostnadsfaktorer	*Uppskattade värden*	*Tillägg*
Investering	**72 Mkr**	
Annuitetsfaktor	**17,7 %**	Under 10 år med 12 % ränta
Mottagningsavgift	1400 kr/ ton TS	
Slam		
Transportkostnad slam	8 kr/ton mil	Lågt antagande
Elkostnad	850 kr/MWh	Högt antagande
Driftspersonal	0,6 Mkr/person, år	
Personalbehov	6 fast anställda	
Årlig fast	2 % av investering	
Underhållskostnad		
Inköp av biobränsle	200 kr/MWh	
Intäkt för fjärrvärme	300 kr/MWh	
Värde för producerad fosfor kr/kg	23 kr/kg (år 2011)	Marknadspris

Table B. Estimated production value of thermo chemical treatment in a BFB-reactor. (Marcus Öhman, 2014)

Årliga kostnadsfaktorer	*Uppskattade kostnader (Mkr)*
Kapitalkostnad	**12,74**
Drift och underhållskostnad	1,44
Personalkostnad	3,60
Elkostnad	2,23
Inköpt biobränsle	20
Transport kostnad slam	2,56
Summa kostnader	**42,57**
Årliga inkomster mkr	
Mottaget slam	11,20
Såld fjärrvärme	29,70
producerad fosfor	4,75
Summerade inkomster	**45,65**
Årligt överskott mkr	3,88
Pay-back tid år	**4,4**
Internränta (10 år avskrivning)	18,3
Återvinningskostnad för fosfor kr/kg	6,3