

Slambränsleblandningar

- Förbränning och fosforutvinning

Linda Bäfver, Caroline Renström,
Johan Fahlström, Patrik Enfält,
Nils Skoglund, Erik Holmén

**Slambränsleblandningar
– Förbränning och fosforutvinning**

**Sludge fuel mixtures
– Combustion and extraction of phosphorus**

Linda Bäfver och Caroline Renström, Pöyry SwedPower

Johan Fahlström, Ragn-Sells

Patrik Enfält, EasyMining Sweden

Nils Skoglund, Umeå Universitet

Erik Holmén, ENA Energi

Projektnummer WR-59

År: 2013

WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 Borås

www.wasterefinery.se

wasterefinery@sp.se

ISSN 1654-4706

Förord

Arbetet i denna rapport har genomförts som ett samarbete mellan Pöyry SwedPower, Ragn-Sells, EasyMining Sweden, ENA Energi och Umeå Universitet. Det har finansierats av Waste Refinery och de deltagande företagen Ragn-Sells, EasyMining Sweden och ENA Energi. Förutom författarna till rapporten har fler personer inom respektive organisationen bidragit till genomförandet. Författarna vill framföra ett stort tack till alla personer som bidragit till projektets genomförande!

Göteborg, december 2013

Sammanfattning

För en hållbar återföring av fosfor behöver man ta tillvara fosfor i avloppsslam, eftersom det är en stor källa till fosfor. Allt slam lämpar sig inte för spridning på åkermark, t.ex. då det har för högt innehåll av tungmetaller. För att nå ett ökat tillvaratagande av fosfor i avloppsslam behövs det därför mer forskning och utveckling av alternativa metoder för att återföra fosfor från avloppsslam till åkermark.

Detta arbete syftar till att visa att man kan samförbränna slam med returträflis (RT-flis) i befintliga pannor och att man sedan kan processa askan för att utvinna fosfor, samt få värdefulla biprodukter från processen. Vidare effekter av projektet blir framtagning av ny kunskap kring förbränning med hög inblandning av slam (35 och 45 % m.a.p. fuktigt bränsle) till RT-flis på rosterpanna, vilket inte studerats vid fullskalig förbränning tidigare. Projektets mål är demonstration av beredning och förbränning av bränsleblandningar av slam och RT-flis, samt efterföljande utvinning av fosfor ur förbränningsaskan. Målgruppen för arbetet är energibolag, leverantörer av rosterpannor, kommuner, avloppsreningsverk, Naturvårdsverket, med flera.

Projektet har innefattat beredning av bränsleblandningar av slam och returträ, proveldningar av bränsleblandningarna och labbförsök på bottenaska och flygaska för fosforutvinning med EasyMining Sweden's metod för fosforutvinning ur aska. Omfattande analyser av bränslen, bottenaskor och flygaskor samt termodynamiska jämviktsberäkningar avseende bildade fosforinnehållande föreningar har genomförts.

Erfarenheterna av beredning av slambränsleblandningar är att blandningarna bör beredas i närtid till att de skall förbrännas, för att undvika att en komposteringsprocess påbörjas i bränslet. Projektet visar att det går att elda slambränsleblandningar med en inblandning av upp till 45 % slam (% avser fuktigt bränsle) på en befintlig rosterpanna under en dag, men för att elda slambränsleblandningar under en längre period och vid hög last behövs högre kapacitet i askutmatningssystem och rökgasrening. Resultaten indikerar en minskad benägenhet till slaggning av bränslebädd vid samförbränning med slam. Analyserna av flygaskor visade också på en tendens till mindre korrosiva askor vid samförbränning med slam. Fosforinnehållet i askorna blev i detta arbete 3-4 %. För processekonomin och ur fosforutvinningssynpunkt är en så hög fosforhalt som möjligt i askan att föredra. Ett högre fosforinnehåll kan åstadkommas genom inblandning av ett bränsle med en lägre askhalt än RT-flis, samförbränning med ett bränsle som har högre fosforinnehåll än RT-flis, eller genom att öka andelen avloppsslam i bränsleblandningen. Om man vill blanda in högre andel slam till bränsle krävs dock en högre torrhalt på slammet för att det ska fungera förbränningsmässigt. Det är i första hand bottenaska som lämpar sig för fosforutvinning med EasyMining Sweden's metod. Skall även flygaska användas för fosforutvinning krävs en optimering av upplösningsförhållandena vilket inte ingick i projektet. Fosfor utvinns i detta arbete som ammoniumfosfat. Renheten hos ammoniumfosfaten är mycket hög, vilket innebär att oönskade ämnen och tungmetaller som finns i avloppsslam inte återförs till och förorenar åkermark.

Nyckelord: avloppsslam, förbränning, fosforutvinning, fosforåterföring.

Summary

For sustainable phosphorus recycling, the phosphorus in sewage sludge needs to be recovered, as it is a major phosphorus-source. However, all sludge is not suitable for direct recycling on agricultural land, e.g. when the content of heavy metals is too high. To achieve an increased recycling of phosphorus from sewage sludge there is a need of research and development of alternative methods to return the phosphorus from sewage sludge to agricultural land.

The aim of the project is to show that sewage sludge can be co-combusted with demolition wood in existing boilers, and that the ash can be processed for extraction of phosphorus, together with valuable by-products from the process. Further effects of the project will be the development of new knowledge about combustion with a high sludge to demolition wood ratio in a grate boiler (up to 45 % sludge with respect to wet mixture), which has not been studied in full-scale combustion earlier. The project's goal is to demonstrate mixing and combustion of fuel mixtures of sludge and demolition wood, and subsequent extraction of phosphorus from ash. The target groups for this work are energy companies, suppliers of grate boilers, municipalities, wastewater treatment plants and authorities.

The project involves the mixing of sewage sludge and demolition wood, combustion-tests of the fuel mixtures and laboratory experiments on bottom ash and fly ash for phosphorus extraction using EasyMining Sweden's method for phosphorus extraction from ash. Extensive analyses have been carried out on fuel, bottom ash and fly ash, as well as thermodynamic equilibrium calculations on the formed compounds containing phosphorus.

The experience of preparing sludge fuel mixtures shows that the mixtures should be prepared in the near future to when they are to be combusted, to avoid a composting process in the fuel. The project shows that it is possible to combust sludge fuel mixtures with an admixture of up to 45 % sludge relative wet fuel, in an existing grate boiler during one day. However, to combust sludge fuel mixtures over a longer period of time and at a higher load, modifications of the de-ashing system and the flue gas cleaning system are needed. The results indicate a reduced tendency of slagging on the fuel bed at the combustion of sludge mixtures. The analyses of the fly ash showed a trend towards less corrosive ash at combustion of sludge mixtures. The phosphorus content in the ash in this work was 3-4 %. For process economics and from the phosphorus extraction point, as high phosphorus content as possible in the ash is preferable. Higher phosphorus content can be accomplished by mixing sludge with a fuel with lower ash content than demolition wood, co-combustion with a fuel with higher phosphorus content than demolition wood, or by increasing the percentage of sewage sludge in the fuel mixture. Still, a higher proportion of sludge in the mixture would require a higher dry matter content of the sludge in order to get proper combustion conditions. It is primarily bottom ash that is suitable for phosphorus extraction using Easy Mining Sweden's method. If fly ash are to be used for phosphorus extraction, an optimization of the dissolution conditions is required, which was not included in this project. In this project, phosphorus is extracted as ammonium phosphate. The purity of ammonium phosphate is very high, which means that unwanted substances and heavy metals in sewage sludge will not be returned to contaminate fields.

Keywords: sewage sludge, combustion, phosphorus extraction, phosphorus recycling.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	PROBLEMBESKRIVNING	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	3
1.3	AVGRÄNSNINGAR	3
2	BAKGRUND	4
3	MATERIAL OCH METODER	6
3.1	BRÄNSLE	6
3.2	TERMODYNAMISKA JÄMVIKTSBERÄKNINGAR	9
3.3	FÖRBRÄNNING	10
3.4	ANALYSER AV ASKOR	11
3.5	UTVINNING AV FOSFOR	12
4	RESULTATREDOVISNING	14
4.1	TERMODYNAMISKA JÄMVIKTSBERÄKNINGAR	14
4.2	FÖRBRÄNNING	16
4.3	ANALYSER AV ASKOR	17
4.4	UTVINNING AV FOSFOR	22
5	RESULTATANALYS	26
5.1	FÖRBRÄNNING	26
5.2	FOSFORUTVINNING	27
5.3	SYSTEMPERSPEKTIV	28
6	SLUTSATSER	32
6.1	BRÄNSLEBLANDNING	32
6.2	FÖRBRÄNNING	32
6.3	FOSFORÅTERVINNING	32
7	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	33
7.1	SLAMBRÄNSLEBLANDNINGAR	33
7.2	FÖRBRÄNNING	33
7.3	FOSFORUTVINNING	33
7.4	FORTSATT ARBETE	34
8	LITTERATURREFERENSER	35

Bilagor

A. Fosforns väg i pannan

B. Detaljerade resultat för fosforutvinning

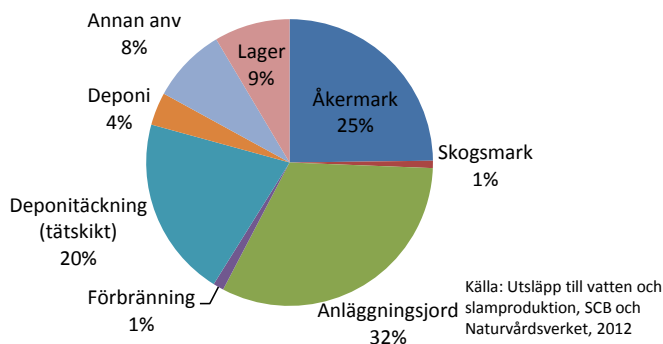
1 Inledning

1.1 Problembeskrivning

Hållbar återföring av fosfor i samhället har nyligen utretts av Naturvårdsverket. För att nå dit föreslår Naturvårdsverket etappmål till miljömålssystemet, med syfte att stimulera en ökad resurshushållning och återföring av växtnärsämnen som är fria från oönskade ämnen. En viktig fosforkälla är avlopp. För avlopp föreslår Naturvårdsverket två etappmål till år 2018 [1]. Det första är att minst 40 % av fosfor i avlopp ska tas tillvara och återföras som växtnäring till åkermark, utan att detta medför en exponering för föroreningar som riskerar att vara skadliga för människor eller miljö. Det andra etappmålet är att minst 10 % av kvävet i avlopp tas tillvara och återförs som växtnäring till åkermark, utan att detta medför en exponering för föroreningar som riskerar att vara skadliga för människor eller miljö.

För en hållbar återföring av samhällets fosfor behöver man ta tillvara fosfor i avloppsslam eftersom det är en stor källa till fosfor. Vid vattenreningen i avloppsreningsverken uppkommer avloppsslam som en biprodukt och 95 % av den ingående fosfor hamnar i avloppsslammet [1]. Reningsverkens årliga produktion av slam år 2010 uppskattades till cirka 203 500 ton torrsbstans (TS). Detta slam innehåller cirka 5 800 ton fosfor. Det motsvarar 65 % av fosfor som tillförs som mineralgödsel, vilket är 9 860 ton/år [2]. I Figur 1 visas de olika användningsområdena för slam. De största användningsområdena idag är som en komponent i anläggningsjord (32 %), direkt spridning på åkermark (25 %) och sluttäckning av deponi (20 %) [3].

Användning av slam 2010



Figur 1. Användning av slam i Sverige.

Figure 1. Use of sewage sludge in Sweden.

Med Naturvårdsverkets föreslagna andra etappmål följer ett behov av en ökad slamspridning till åkermark, eftersom endast 20 % av kvävet i avlopp blir kvar i slammet efter reningen. Kravet om 10 % återföring medför således att hälften av allt slam skulle behöva spridas på åkern jämfört med de 25 % som sprids idag. För att kunna uppnå en ökad spridning av slam på åkermark skulle det behövas en ökad acceptans för slammet hos lantbrukare, kommuner, myndigheter och konsumenter. Därtill lämpar sig inte allt slam för spridning på åkermark, till exempel sådant slam som har ett högt innehåll av tungmetaller,

framförallt kadmium. Utöver tungmetaller finns även risker med smittämnen, hormonstörande ämnen och antibiotikaresistens vid användning av avloppsslam. För att nå ett ökat tillvaratagande av fosfor i avloppsslam behövs det därför mer forskning och utveckling av metodik för alternativ till slamspridning på åkermark, alternativ där man istället utvinnet fosfor ur slammet.

En alternativ väg för behandling av avloppsslam där allt slam kan behandlas, riskerna kan undvikas och fosfor ändå återförs till åkermark är att först förbränna slammet. Då fås en effektiv eliminering av smittämnen och läkemedelsrester. Efter förbränning återfinns fosfor i askan tillsammans med andra askelement, bland dem tungmetaller. Beroende på nivån av tungmetaller i askan kan det i vissa fall vara möjligt med direkt spridning av askan på åkermark. För att uppnå en renare produkt behöver dock askan processas för utvinning av fosfor och andra ämnen. Separeras även tungmetaller i processen bidrar man också till miljömålet En giftfri miljö.

I länder och städer med hög befolkningstäthet finns det storskaliga förbränningsanläggningar där slam förbränns som enda bränsle, så kallad monoförbränning av slam. Syftet är att reducera mängden avfall som ska hanteras. Monoförbränning av slam kräver investeringar i omfattande ombyggnad av befintliga förbränningsanläggningar, alternativt byggnation av nya förbränningsanläggningar som är särskilt anpassade för förbränning av slam. Om slam skall användas som enda bränsle behövs dessutom en energikrävande förtorkning av slammet innan det kan förbrännas.

I syfte att bli kvitt slam blandas det också in till kraftverk som eldar kol eller avfall. I Sverige är det dock bara 1 % av avloppsslammet som förbränns [3]. Inblandning av slam till befintliga svenska pannor skulle ge ett bra tillvaratagande av slammets energi-innehåll eftersom pannorna är anslutna till fjärrvärmenät. Ur ett svenskt perspektiv, med låg befolkningstäthet och väl utbyggt fjärrvärmenät, vore det fördelaktigt om man kunde förbränna slam i befintliga förbränningsanläggningar utan förtorkning (eller med en lägre grad av förtorkning). Ett sätt är att samförbränna slam med ett relativt torrt bränsle så att den resulterande fukthalten blir acceptabel.

Det har genomförts flera svenska projekt kring samförbränning med slam. Tidigare arbeten har visat på slammets goda förbränningsegenskaper vid samförbränning med biobränsle eller avfall [4][5][6][7]. Det har också gjorts en studie av att utvinna fosfor ur samförbränningsaska [8]. Huvuddelen av tidigare förbränningsförsök med slam har utförts i fluidiserade bäddar, vilket är fördelaktigt med avseende på såväl jämn och väldefinierad bäddtemperatur som god omblandning. En nackdel om man skall utvinna fosfor ur askan är dock att bottenaskan kommer att innehålla bäddsand, vilket ger en utspädning av askan och därigenom ett lägre fosforinnehåll. Det undviks om slam istället förbränns i en rosterpanna.

Detta projekt handlar om att undersöka förbränning av blandningar av slam och returträflis (RT-flis) storskaligt i en befintlig kraftvärmeanläggning (ENA Energi i Enköping) och att därefter använda askan i en process för att ta tillvara fosfor och separera oönskade metaller. Därigenom kan fosfor från avloppsslammet tillvaratas och återföras till jordbruksmark på ett alternativt sätt med låg tillförsel av oönskade föroreningar. I arbetet ingår beredning av slambränsleblandningar, förbränning av blandningarna och förädling av förbränningsaskan för utvinning av fosfor och andra ämnen. Denna ansats är anpassad till

svenska förhållanden, där fjärrvärmenätet är väl utbyggt och slammets energiinnehåll kan tas tillvara, och skiljer sig ifrån övriga Europa där slam förbränns i destruktions syfte, med ett lågt tillvaratagande av energin i slamm.

Bakgrunden till valet av RT-flis som samförbränningsbränsle är att det är ett relativt torrt bränsle, vilket möjliggör en hög inblandning av fuktigt slam, utan att det behöver förtorkas. Jämfört med många andra avfallsbränslen så är RT-flis ett relativt homogent avfallsbränsle, vilket är fördelaktigt eftersom det ger en någorlunda jämn kvalitet på askan från förbränningen. Användande av ett homogent bränsle är också viktigt när man skall jämföra olika driftfall med varandra. Slutligen så har RT-flis även fördelen att det till största delen består av trä, så många av slutsatserna från arbetet gäller även för biobränsle.

Projektet bidrar med ny kunskap om samförbränning av avloppsslam och RT-flis samt möjligheterna till fosforutvinning ur aska. Det är en första ansats till ett effektivt system för förbränning av avloppsslam och fosforåterföring ifrån askan, anpassat för svenska förhållanden och avsett att fungera för befintliga förbränningsanläggningar. Förhoppningen är att arbetet skall bidra till ett ökat intresse för möjligheten att använda slam som bränsle med efterföljande utvinning av fosfor ur askan. Arbetet förväntas visa på en alternativ väg för hantering av avloppsslam med hållbar återföring av fosfor.

1.2 Syfte och mål

Detta projekt syftar till att visa att man kan samförbränna slam med RT-flis i befintliga pannor och att man sedan kan processa askan för att utvinna fosfor, samt få värdefulla biprodukter från processen. Vidare effekter av projektet blir framtagning av ny kunskap kring förbränning med hög inblandning av slam (35 och 45 % m.a.p. fuktigt bränsle) till RT-flis i rosterpanna, vilket inte studerats på en fullskalig förbränningsanläggning tidigare.

Projektets mål är demonstration av beredning och förbränning av bränsleblandningar av slam och RT-flis, samt efterföljande tillvaratagande av fosfor i förbränningsaskan.

Målgruppen för arbetet är energibolag, leverantörer av rosterpannor, kommuner, avloppsreningsverk, Naturvårdsverket, med flera.

1.3 Avgränsningar

Arbetet begränsar sig till en fallstudie vid en kommersiell förbränningsanläggning där förbränning av två olika slambränsleblandningar utvärderas. Studien avgränsar sig också till att omfatta en process för utvinning av fosfor ur aska: EasyMining Sweden's process. Vidare begränsar sig arbetet till en enkel förbränningsteknisk utvärdering, med utgångspunkt i dokumentation av driftdata, observation av förbränningsanläggningens drift, samt provtagning och analys av flygaska och bottenaska.

2 Bakgrund

Inblandning av slam vid förbränning av avfall eller biobränsle har positiva effekter på förbränningsprocessen. Det medför mindre sintring i en fluidiserad bädd, minskad bildning av beläggningar på värmeöverförande ytor och mindre korrosion [4][5][6][7]. Nyligen konstaterades att det även är gynnsamt att tillföra slam vid rosterförbränning av avfall [9]. Det har också gjorts studier av hur man kan laka ut fosfor och andra ämnen ifrån samförbränningsaska [8]. I ett europeiskt forskningsprojekt har det demonstrerats förbränning av slam och återföring av fosfor ur slamaskan i Österrike [10]. Tekniken kallas Ash Dec och bygger på behandling av aska från monoförbränning av slam, d.v.s. när slam eldas som enda bränsle. Monoförbränning av slam kräver särskilt anpassade pannor, så för att applicera det i Sverige skulle det krävas investeringar i torkningsutrustning, ombyggnad av befintliga pannor, alternativt helt nya pannor.

Ash Dec är en termokemisk metod som bygger på upphettning av slamaska, vilket är energikrävande. Processens huvudsyfte är att rena slamaskan från främst tungmetaller, så att den kvarvarande askprodukten, efter näringstillsats och pelletering, kan användas som gödsel [11]. Processen utgörs av rostning av askan i en roterande ugn vid ca 1000 °C under närvaro av kalciumklorid eller magnesiumklorid. Uppehållstiden i ugnen är ca 20 minuter. Under processen bildas metallklorider som avgår från askan som gas och avskiljs genom rening av processgasen. I den upphettade askresten återfinns fosfor i form av kalcium- eller magnesiumfosfat, vilka dock har mycket låga växtnäringsvärden. Kalciumfosfaten (eller magnesiumfosfat) kräver därför ytterligare behandling om den ska kunna bli ett effektivt gödselmedel.

Flera utredningar har genomförts kring möjligheten att återföra fosfor genom monoförbränning av slam för svenska förhållanden, t.ex. för Henriksdals reningsverk i Stockholm, gjort av KTH i samarbete med Stockholm Vatten. I arbetet ingick studier av utvinning av fosfor från aska [12]. I Falun planerade man för drygt 10 år sedan att uppföra en anläggning för monoförbränning av slam med tillhörande utvinning av fosfor ur askan [13]. Tekniken som skulle användas hade utvecklats av företaget BioCon. Det blev ingen kommersialisering av BioCon-tekniken och ingen anläggning byggdes i Falun, p.g.a. att BioCon blev uppköpt av ett företag som lade ner satsningen på fosforutvinning. BioCon's teknik byggde bl.a. på upplösning av aska med syra och därefter användande av jonbytare, för att ge fosforsyra, vilken kan användas som råvara vid produktion av fosforgödselmedel.

Vidare finns det metoder för fosforutvinning ur avloppsvatten som idag är i drift, men de förutsätter biologisk fosforrening på reningsverket, vilket är mindre vanligt i Sverige. De två metoderna är Ostara [14], vilken bygger på utfällning av struvit ($MgNH_4PO_4$) ur avloppsvatten, och Crystallactor [15], vilken bygger på fällning av kalciumfosfat ur avloppsvatten. I Sverige körs försök med Ostara-processen på reningsverket i Halmstad och man utvinner upp till 25 % av fosfor i avloppsvattnet [16].

Monoförbränning av slam och efterföljande tillvaratagande av fosfor med Ash Dec-metoden ger lägre förekomst av föroreningar jämfört med direkt spridning av avloppsslam på åkermark [17]. Dock är Ash Dec-processen inte tillämpbar för samförbränning av slam och avfall, då det skulle ge för högt innehåll av oönskade metaller i askprodukten.

Begränsningen med ett högt metallinnehåll i askan finns inte för EasyMining Sweden's metod för fosforutvinning ur askor [18]. Tekniken är utvecklad för utvinning av fosfor ur olika råmaterial som apatit, askor m.fl. Processen för slamaska bygger på en upplösning av materialet i syra följt av olika steg av bl.a. vätskeextraktion och kemisk utfällning, där den utvunna fosfor kommer ut ur processen som vattenlöslig ammoniumfosfat. Ammoniumfosfat är världens mest tillverkade mineralgödselmedel för fosfor. Förutom att utvinna fosfor i processen hanteras alla upplösta ämnen på ett resurseffektivt sätt, där ingående kemikalier blir del av de framtagna produkterna, så som gips och fällningskemikalier (som används för att fälla ut fosfor i avloppsreningsverk). I ett separat fällningssteg tas oönskade tungmetaller ut.

3 Material och metoder

Projektet innefattar beredning av bränsleblandningar av slam och returträ, proveldningar av bränsleblandningarna och labbförsök på bottenaska och flygaska för fosforutvinning. Omfattande analyser av bränslen, bottenaskor och flygaskor ingår i arbetet. Termodynamiska jämviktsberäkningar används för att förstå förbränningsförloppet, särskilt med avseende på bildade fosforinnehållande föreningar. Genomförandet av projektet har haft näringsämnet fosfor i fokus i alla faser.

3.1 Bränsle

Den returträflis (RT-flis) som användes till försöken bereddes på Ragn-Sells anläggning i Högbytorp. Förutom trä, 97,4-98,9 % av materialet, så innehöll RT-flisen även mindre mängder av metall, plast, papper, sten, glas och textilt material. Figur 2 visar en bild på RT-flisen, och sammansättningen redovisas i Tabell 1. Förekomst av föroreningar varierade mellan proven.



Figur 2. Bild på RT-flisen.

Figure 2. Picture of the demolition wood.



Figur 3. Bild på det rötade avloppsslammet.

Figure 3. Picture of the sewage sludge.

Tabell 1. RT-flisens innehåll med avseende på olika avfallsfraktioner (vikt-%).

Table 1. The composition of demolition wood with respect to waste fractions (weight-%).

	RT _a	RT _b	RT _c
Trä	98,9	98,4	97,4
Metall *	0,3	0,7	1,5
Plast *	0,2	0,5	0,2
Papper	0,5	0,1	0,4
Sten/glas *	0,03	0,1	0,3
Textil	0,1	0,2	0,2

* Ingår ej i bränsleanalys, plockades bort

Det rötade avloppsslammet som användes kom från SYVABs reningsverk (Himmerfjärdsverket) och hade lagrats på Högbytorp under ca 12 månader. Figur 3 visar en bild på avloppsslammet. Slammet valdes med hänsyn till den geografiska närheten och för att det kommer från ett reningsverk där järnsulfat används som huvudsaklig fällningskemikalie, eftersom det är den för fosforfällning vanligaste fällningskemikalien som används i de stora svenska reningsverken. I Tabell 2 visas bränsleanalys för den RT-flis

och det avloppsslam som användes i arbetet. Tre analyser gjordes av respektive bränsle. RT-flis varierade mer i sin sammansättning än vad slammet gjorde. Värmevärdet för RT-flis varierade mellan 17,9-18,6 MJ/kg_{ts}, och variationen återspeglas också i en varierande askhalt på 8,6 - 2,9 %. För slammet var värmevärdet 12,5-12,7 MJ/kg_{ts} och askhalten i det torra slammet var 41-42 %. Fosforinnehållet i torkat slam var drygt 3 %, medan RT-flisens innehåll av fosfor var <0,01 %.

Tabell 2. Värmevärde och sammansättning för RT-flis och slam. ts= torr substans.

Table 2. Heating value (LHV) and composition of demolition wood and sewage sludge. ts=dry substance.

	RT _a	RT _b	RT _c	Slam _a	Slam _b	Slam _c
Fukthalt (%)	16,8	17,7	13,9	76,1	76,4	76,1
Effektivt värmevärde (MJ/kg _{ts})	17,9	18,0	18,6	12,7	12,5	12,5
Kol, C (vikt-% ts)	46,5	48	48,7	32	30,8	30,6
Syre, O (vikt-% ts)	38	39	42	17	18	19
Väte, H (vikt-% ts)	5,5	5,8	5,8	4,4	4,3	4,2
Kväve, N (vikt-% ts)	1,2	1,3	1	3,7	3,6	3,5
Svavel, S (vikt-% ts)	0,11	0,11	0,06	1,4	1,4	1,3
Klor, Cl (vikt-% ts)	0,05	0,05	0,04	0,07	0,07	0,06
Aska (vikt-% ts)	8,6	5,7	2,9	41,0	41,9	41,7
Aluminium, Al (vikt-% ts)	0,52	0,31	0,15	2,58	2,68	2,69
Kisel, Si (vikt-% ts)	1,9	1,2	0,51	5,2	5,6	5,3
Järn, Fe (vikt-% ts)	0,47	0,19	0,16	5,79	5,58	5,64
Titan, Ti (vikt-% ts)	0,14	0,12	0,09	0,45	0,46	0,46
Mangan, Mn (vikt-% ts)	0,01	0,01	0,01	<0,05	<0,05	<0,05
Magnesium, Mg (vikt-% ts)	0,15	0,10	0,06	0,46	0,50	0,49
Kalcium, Ca (vikt-% ts)	0,63	0,50	0,30	2,86	2,83	3,09
Barium, Ba (vikt-% ts)	0,02	0,01	0,02	<0,05	<0,05	<0,05
Natrium, Na (vikt-% ts)	0,19	0,12	0,08	0,28	0,27	0,26
Kalium, K (vikt-% ts)	0,18	0,14	0,10	0,57	0,58	0,54
Fosfor, P (vikt-% ts)	<0,01	<0,01	<0,01	3,08	3,13	3,26
Koppar, Cu (mg/kg ts)	92	210	38	350	340	360
Vanadin, V (mg/kg ts)	8	5	3	25	26	25
Krom, Cr (mg/kg ts)	29	20	15	46	51	46
Kobolt, Co (mg/kg ts)	4	3	2	12	13	12
Nickel, Ni (mg/kg ts)	12	17	4	32	34	31
Zink, Zn (mg/kg ts)	270	300	180	950	1100	850
Bly, Pb (mg/kg ts)	37	34	22	23	24	23
Kadmium, Cd (mg/kg ts)	0,3	0,3	0,3	<0,5	<0,5	<0,5
Molybden, Mo (mg/kg ts)	3	2	<1	6	6	6
Arsenik, As (mg/kg ts)	8	4	6	<10	<10	<10

Inför de två förbränningsförsöken blandades slam med RT-flis på Ragn-Sells anläggning Högbytorp. Slammet och RT-flisen blandades först grovt med hjälp av en hullastare och sedan med en Alu-skopa för att åstadkomma en homogen blandning. Slam och RT-flis blandades i två olika förhållanden, med avseende på fuktigt bränsle var andelen slam 35 % respektive 45 % i de två olika blandningarna (RT-flisens fukthalt var 14-18 % och slammets 76 %). I den första blandningen mixades 70 ton slam med 130 ton RT-flis. I den andra blandningen höjdes inblandningen av slam till 90 ton och mängden RT-flis minskades till 110 ton. Blandningarna genomfördes två dagar före respektive förbränningsförsök. Tack

vare densitetsskillnaden mellan slam och RT-flis försvinner slammet in i RT-flisen och blir knappt synbart. Fukthalten och det organiska innehållet i slammet i kombination med träflis gör att blandningen omgående går in i en komposteringsfas.

Tabell 3. Värmevärde och sammansättning på RT-flis (medelvärden) och slambränsleblandningarna (beräknat ur analyser av RT-flis och slam).

Table 3. Heating values and compositions of demolition wood (mean values) and the fuel mixtures of sewage sludge (calculated from analyses of demolition wood and sewage sludge).

	RT	35/65 mix	45/55 mix
Fukthalt (%)	16,1	37,2	43,2
Effektivt värmevärde (MJ/kg _{ts})	18,1	15,9	15,2
Kol, C (vikt-% ts)	47,7	45,5	44,6
Syre, O (vikt-% ts)	39,7	30,1	27,1
Väte, H (vikt-% ts)	5,7	5,5	5,4
Kväve, N (vikt-% ts)	1,2	1,5	1,6
Svavel, S (vikt-% ts)	0,09	0,26	0,33
Klor, Cl (vikt-% ts)	0,05	0,05	0,05
Aska (vikt-% ts)	5,7	10,4	12,5
Aluminium, Al (vikt-% ts)	0,33	0,63	0,76
Kisel, Si (vikt-% ts)	1,2	1,7	2,0
Järn, Fe (vikt-% ts)	0,27	0,99	1,29
Titan, Ti (vikt-% ts)	0,12	0,16	0,18
Mangan, Mn (vikt-% ts)	0,01	<0,02	<0,02
Magnesium, Mg (vikt-% ts)	0,10	0,15	0,17
Kalcium, Ca (vikt-% ts)	0,48	0,80	0,94
Barium, Ba (vikt-% ts)	0,02	<0,02	<0,02
Natrium, Na (vikt-% ts)	0,13	0,15	0,16
Kalium, K (vikt-% ts)	0,14	0,20	0,22
Fosfor, P (vikt-% ts)	<0,01	<0,43	<0,6
Koppar, Cu (mg/kg ts)	113	144	157
Vanadin, V (mg/kg ts)	5	8	9
Krom, Cr (mg/kg ts)	21	25	26
Kobolt, Co (mg/kg ts)	3	4	5
Nickel, Ni (mg/kg ts)	11	14	15
Zink, Zn (mg/kg ts)	250	344	384
Bly, Pb (mg/kg ts)	31	30	29
Kadmium, Cd (mg/kg ts)	0,3	<0,3	<0,3
Molybden, Mo (mg/kg ts)	2	<3	<3
Arsenik, As (mg/kg ts)	6	<7	<7

I Tabell 3 visas RT-flisens och slambränsleblandningarnas värmevärde och sammansättning som ett medelvärde av de tre bränsleproven. Värmevärdena och sammansättningar för slambränsleblandningarna är beräknade med data från separata analyser av RT-flis och slam (Tabell 2). Slambränsleblandningarna hade fukthalter på 37 och 43 %, vid 35 respektive 45 % slam, vilket är betydligt högre än RT-flisens fukthalt på 16 %. De beräknade värmevärdena för slambränsleblandningarna var 15,9 respektive 15,2 MJ/kg_{ts} jämfört med RT-flisens värmevärde på 18,1 MJ/kg_{ts}. Vidare var innehållet av aska i slambränsleblandningarna ungefär dubbelt så högt som i RT-flisen. Tillförseln av slam

återspeglas också av ett högre innehåll av metaller i slambränsleblandningarna jämfört med RT-flisen. Innehållet av kväve i slambränsleblandningarna var ca 30 % högre än i ren RT-flis och svavelinnehållet ungefär tre gånger så högt.

3.1.1 Analyismetoder

Bränslet provtogs från bränslehögar av slam respektive RT-flis. Representativa bränsleprov eftersträvades och slammets provtogs av en utbildad provtagare. RT-flis provtogs till sopsäckar och slam till 10 liters hinkar. RT-flisen analyserades avseende vilka fraktioner av olika material (trä, plast, papper, etc.) den bestod av. Alla bränslen analyserades med avseende på värmevärde, fukthalt, askhalt, C, H, N, S, Cl, huvudelement och spårelement. Konventionella metoder användes för analyserna (SS-EN 14918, SS-EN 14774-2, SS-EN 14775, SS-EN 15104, SS-EN 15289, SS-EN 15289 A). Syre beräknades som en differens mellan 100 % och analyserade komponenter. Huvudelement, såsom Ca, Si, K, Na och P, analyserades för att följa fosfor och för att kunna studera den övergripande ask-kemin i pannorna vid förbränningen. Spårelement (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Co, Ni, Zn, V, Mo) analyserades för att få en bild av innehållet av tungmetaller. ICP-OES användes för analys av huvudelement och spårelement. Bränslets innehåll har en viss variation, så för att få mer pålitliga data gjordes tre bränsleanalyser av respektive bränsleblandning. Alla analyser av bränslet utfördes av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

3.2 Termodynamiska jämviktsberäkningar

Termodynamiska jämviktsberäkningar utfördes i två steg. Först användes en preliminär bränslesammansättning inför försöken för att enkelt utvärdera de tilltänkta inblandningsgraderna med hjälp av befintliga bränsleanalyser av RT-flis och slam. När de material som skulle användas som bränsle i försöken förberetts och analyserats användes dessa data som grund för ytterligare en beräkningsomgång. Mjukvaran som användes för dessa beräkningar var FactSage 6.2 i den första beräkningsserien och FactSage 6.4 för de slutgiltiga bränsleblandningarna. De databaser som utnyttjades var FactPS (tidigare Fact53, inkluderar grundämnen), FToxid (oxider inklusive karbonater, sulfater, fosfater), FTPulp (kalium och natrium (tillåts associera fritt med anjonerna), klorider, sulfater och karbonater) samt FToxid-SlagA/-SlagB/-SlagC (för att stegvis kunna studera fasta lösningar och glas). Även om FToxid-SlagC innehåller lösningar som inkluderar fosfater så valdes här FToxid-SlagB, eftersom SlagC inte klarade av att modellera de aktuella bränsleblandningarna för det valda temperaturintervallet. I den här studien presenteras resultaten från beräkningarna i FactSage 6.4. I dessa beräkningar har luftöverskott (oxiderande förhållanden) förutsatts i samtliga fall, något som inte kan förväntas gälla i alla delar av bädden i en panna.

En begränsning vid den här typen av beräkningar är alltid hur omfattande de använda databaserna är. Specifikt utgör bristen av tillgängliga termodynamiska data för flera typer av fosfater en begränsning i den här studien. De termodynamiska data som ligger till grund för lösningsmodellerna (FToxid-SlagA/B) spänner i flera fall över begränsade temperaturområden, men har för den här studien extrapolerats till att omfatta hela det temperaturspann som har undersökts. Trots dessa brister ger termodynamiska jämviktsberäkningar ett värdefullt stöd när det gäller val av inblandningsgrader, vilka föreningar som kan förväntas bildas och en indikation om vilka askrelaterade utmaningar som kan väntas under drift.

3.3 Förbränning

De olika bränsleblandningarna eldades på en rosterpanna. Vid alla provledningarna kördes pannan på ca 50 % last.

3.3.1 Förbränningsanläggning

Provledningarna genomfördes på en 55 MW_{th}/24 MW_{el} kraftvärmepanna i Enköping, ägd av ENA Energi. Anläggningen rymmer även en träpulvereldad hetvattenpanna, en oljeeldad hetvattenpanna, en elpanna samt en ackumulatortank på 325 MWh. Kraftvärmepannan står för produktion av värme under största delen av året, medan övriga pannor används vid lågt värmebehov och som spets- och reservlast.

Bränslet kan tas emot i en mottagningsficka och genom tippning på gårdsplan. I bränslehanteringssystemet ingår bränsleberedning med magnetavskiljning och såll. Från sållet kastas överstort material direkt ned i en container. Vid förbränningen av slambränsleblandningar kontrollerades vad för slags överstort material som sållades bort. Containern vägdes också före försöken för att möjliggöra utvägning av överstort material.

Kraftvärmepannan är designad för flisade bränslen med en fukthalt på 40-55 %. I pannan eldas blandningar av grot/bark/träflis och RT-flis. Pannan är en Burmeister & Wain med vibrationsrost. Bränslet kastas in till rostern med en inkastare/spreader. Rostern vibrerar med jämna mellanrum för att bränsle och aska skall röra sig framåt. Vidare lutar rostern för att underlätta bortförel av bottenaska. Primärluft tillförs under rostern, emedan sekundär och tertiär luft tillförs på olika nivåer i eldstaden ovanför rostern.

För rening av kväveoxidemissioner används ett SNCR-system (Selective Non Catalytic Reduction) installerat i pannan. I SNCR-systemet sprutas ammoniak in för reduktion av NO_x. Stoft från förbränningsprocessen reduceras i ett elektrostatiskt filter. SO₂ och HCl fångas upp i rökgaskondensorn, kondensvattnet från denna blir surt och neutraliseras genom tillsats av lut.

3.3.2 Provedningar

Vid försöken med slambränsleblandningar tippades bränslet på ENA Energis gårdsplan och lastades sen, med hjälp av hjullastare, till mottagningsfickan.

Vid förbränningsförsöken kördes anläggningen så att pannan gick på ungefär 50 % last, med en avgiven fjärrvärmeeffekt på 25 MW och en eleffekt på 9-10 MW. Lasten valdes av praktiska skäl, för att minimera risker med störningar i produktionen av el och värme och för att det fanns en begränsning i askutmatningskapacitet för bottenaskan. De tre olika provedningarna utfördes vid samma pannlast, vilket kunde säkerställas genom att pannan är kopplad till en stor ackumulatortank som kan ta upp den producerade värmen. Eftersom slambränsleblandningarna hade ett lägre värmevärde än RT-flis höjdes inmatningsflödet för bränslet för att kompensera denna skillnad. Mängden bränsle som eldades vid respektive provedning räckte till ca 12 timmars drift vid 50 % last. Inför varje provedning kördes pannan på aktuellt bränsle under en viss tid för att uppnå stabila förhållanden, varefter provtagningar av askor utfördes och slutligen eldades resterande bränslemängd upp.

Insamlingen av bottenaska justerades för den tidsfördröjning det tar innan inkommande bränsleaska når ut som flyg- respektive bottenaska. Utrymmet där bottenaskan faller efter rostret rensades på gammal aska när bottenaskan från slambränsleblandningarna började komma. Bottenaskan samlades upp i en särskild container vid respektive försök. Varje driftfall kördes under en dag. De olika driftfallen var:

- Referensfall: RT-flis (100 %)
- 35 % slam och 65 % RT-flis (m.a.p. fuktigt bränsle)
- 45 % slam och 55 % RT-flis (m.a.p. fuktigt bränsle)

Vid proveldningarna gjordes provtagningar av flygaska och bottenaska till kemiska analyser och för senare labförsök med fosforutvinningsprocess. Flygaska provtogs vid 3-4 tillfällen under respektive försök. Varje provtagningstillfälle tog ca 1 timma varvid en 3-liters hink fylldes med aska. Provtagning av flygaska gjordes under elfiltret. Bottenaskan provtogs vid 3-4 tillfällen under respektive försök, från askhøgen under den våta askutmatningen. Vid varje provtagning fylldes en 3-liters hink. Vid varje proveldning gjordes också provtagning av bränsle i observationssyfte. Koncentrationer av gasformiga komponenter, d.v.s. O₂, CO₂, CO och NO_x, mättes genom förbränningsanläggningens ordinarie mätsystem.

3.4 Analyser av askor

Analyser av askor gjordes som en del i att följa fosfors väg genom förbränningsprocessen. Askanalyserna var också viktig indata till försöken med fosforutvinning.

3.4.1 Svavel, klor, fosfor och metaller

Provtagna flygaskor och bottenaskor analyserades, med avseende på S, Cl, huvudelement och spårelement, med samma metoder som användes för analys av bränslets innehåll av huvudelement och spårelement. Det gjordes tre repeterande analyser av varje prov av bottenaska och flygaska, mot bakgrund av de variationer i innehållet som förväntades. Våtkemiska metoder har använts för analys av askans innehåll. De olika metoderna som användes var:

- Upplösning av askprov i salpetersyra, följt av analys med ICP-AES för analys av Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Zn. Utfört på Agrilab AB.
- Upplösning av askprov i salpetersyra följt av analys med ICP-MS för analys av As, Cd, Cr, Cu, Co, Fe, Mo, Ni, Pb, Si, Zn. Utfört på Ragn-Sells AB's interna lab.
- Lakning av aska i Milli-Q-vatten följt av analys med spektrofotometer för analys av Cl och vattenlöslig S. Utfört på Ragn-Sells AB's interna lab.

3.4.2 XRD-bestämning av föreningar

De sex askfraktionerna analyserades kvalitativt med hjälp av pulverröntgendiffraktometri (XRD) för att undersöka i vilken kemisk form fosfor kunde återfinnas. Instrumentet som användes var en D8Advance diffraktometer med en 1,0 mm divergensslit, en Våntec-1 linjedetektor och med Cu K α -strålning. För den kvalitativa utvärderingen användes Diffrac^{Plus} EVA 10.0 med referensdatabasen PDF-2 [19]. Semi-kvantitativ bestämning av

innehållet i askfraktionerna utfördes med hjälp av Rietveldförfining och programvaran Topas 2.1. Som indata hämtades kristallstrukturerna för de föreningar som identifierats kvalitativt från ICSD Web [20]. Detta ger en kvantitativ bestämning av de kristallina faserna i förhållande till varandra, däremot kan inget sägas om den amorfa delen av askfraktionen vilket är anledningen till att resultaten kallas semi-kvantitativa. Resultaten som erhålls genom Rietveldförfining ger tydlig information gällande askkemin. De kan också användas för att i ett senare skede modifiera bränsleblandningar, för att exempelvis minska risken för smältbildning eller se hur egenskaperna hos flygaska förändras. Analyserna utfördes vid Umeå Universitet.

3.4.3 Siktning för bestämning av storleksfördelning

Askproverna siktades för bestämning av fraktionsandel under 2 mm respektive andelen under 0,5 mm. Runda sällådor, som vanligtvis används för siktning av jord användes. Sällådor med väldefinierade hålstorlekar spänns fast i en anordning som skakas en bestämd tid. Därefter vägs erhållna storleksfraktioner ut.

3.4.4 Asksmältförlopp för bottenaskor

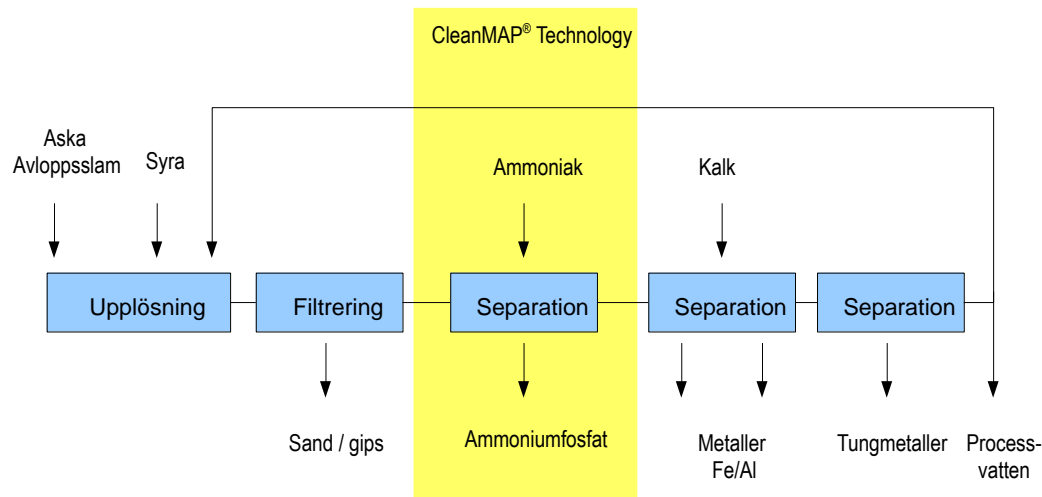
Bottenaskorna analyserades med avseende på asksmältförlopp, för att få en bild av risken för agglomerering på bränslebädden. Metoden som användes för analysen följde standard prEN 15370:2007/15404:2010. Före analys maldes askan och formades till en cylinder, varefter den stoppades i en ugn som succesivt värmdes upp från 300 °C till 1500 °C. Under uppvärmningen observerades hur formen på cylindern påverkades. Först observerades en krympningstemperatur (då cylindern har krympt 5 % i förhållande till arean den hade vid 550 °C). Sen kommer deformationstemperaturen vilket är den temperatur där askan börjar kladda, d.v.s. en kritisk temperatur avseende slaggbildning. Deformationstemperaturen kallas också initial smälttemperatur. Därefter observerades en halvsfärstemperatur, som innebär att provet sjunkit ihop och ser ut som en halv sfär. Sist nåddes flyttemperaturen, som är den temperatur då höjden på provet motsvarar hälften av dess höjd vid halvsfärstemperaturen. Analyserna utfördes av BELAB.

3.5 Utvinning av fosfor

Labförsöken med processen för fosforutvinning från askproverna utfördes med EasyMining Sweden's process för utvinning av fosfor ur slamaska efter att upplösningsförfarandet modifierats att passa askan från slambränsleblandningarna.

3.5.1 EasyMining Sweden's process för utvinning av fosfor

Den av EasyMining Sweden utvecklade processen för utvinning av fosfor och andra ämnen ur avloppsslamaska beskrivs schematisk nedan, Figur 4. Askan löses upp i syra varefter en unik kombination av bl.a. vätskeextraktion och kemisk fällning tillämpas. Ur processen kommer ett rent, vattenlösligt ammoniumfosfat (fosforgödselmedel), järn och aluminium i form av fällningskemikalier, samt gips. Processen är resurseffektiv och de ingående kemikalierna blir del av produkterna. I processen recirkuleras processvätskan och återanvänds. De tungmetaller som ingår faller ut som separata biprodukter för deponering. Processvattnet som lämnar processen är surt och behöver neutraliseras.



Figur 4. En schematisk beskrivning av EasyMining Sweden's process för slamaska.

Figure 4. A schematic description of the EasyMining Sweden's process for sewage sludge.

3.5.2 Labförsök

Labförsök med EasyMining Sweden's upplösningssprocess för slamaska genomfördes på de provtagna askorna från de två proveldningarna med 35 respektive 45 % slamblandning. Labförsök för utvinning av fosfor gjordes på delprover uttagna vid proveldningarna. Totalt användes 14 stycken askprover, sju stycken från bottenaska respektive sju från flygaska, varav fyra prover av vardera asktypen från försöken med den 35%-iga inblandningen av avloppsslam respektive tre stycken av vardera asktypen med den 45%-iga slamblandningen. Askmängden i proverna uppgick till ca 0,1 kg vardera.

Innan de faktiska labförsöken genomfördes gjordes inledande försök för att anpassa processens vätskemängd, syramängd och upplösningstid till den samförbrända bottenaskans förutsättningar.

Askupplösningen skedde i en syralösning med ett bestämt förhållande emellan syralösningens volym och mängden aska. Upplösningen skedde under omrörning och under en bestämd tid. Lakvätskan filtrerades och prov togs ut för analys av P, Al, Fe, Ca, Cu, K, Mg, Mn, Na och S. Analys av lakvätska gjordes med ICP-AES av Agrilab AB (samma metod och lab. som för analyserna av askor). Det gjordes också analyser av renheten hos gipset (As, Cd, Cr, Hg, Pb m.fl.) och ammoniumfosfaten (Cd, Cu, Ni och Zn) som producerades i processen.

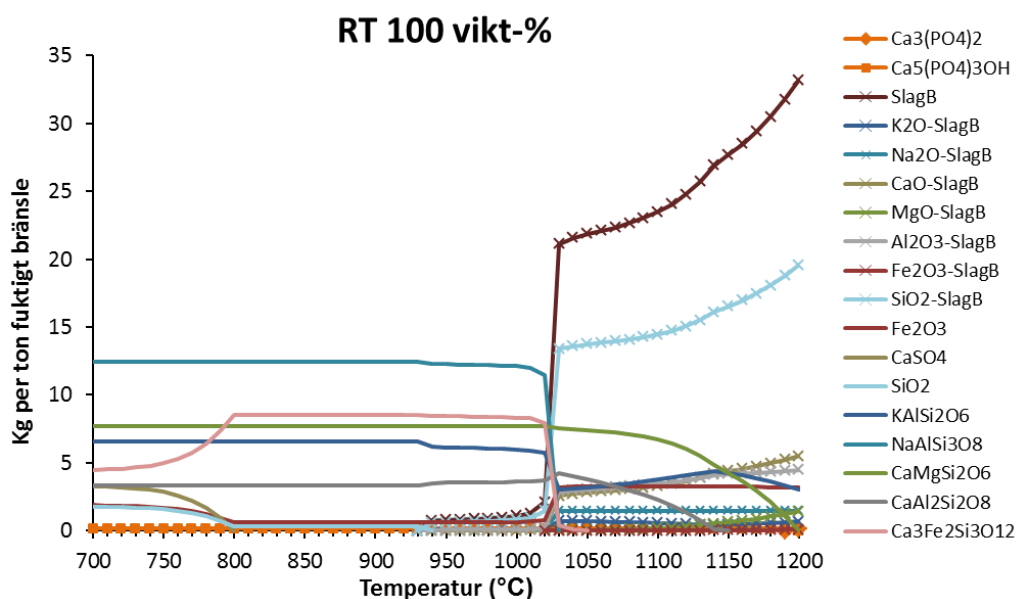
Resultaten utvärderades. Upplösningsgrad samt utvinningsgraden beräknades och utgjorde grund för massbalansberäkningen för systemet. För massbalansen har medelvärdet av resultaten från processen för respektive försöks bottenaskor använts. Bottenaskorna valdes för att den största andelen aska går ut som bottenaska ifrån rosterpannor.

4 Resultatredovisning

4.1 Termodynamiska jämviktsberäkningar

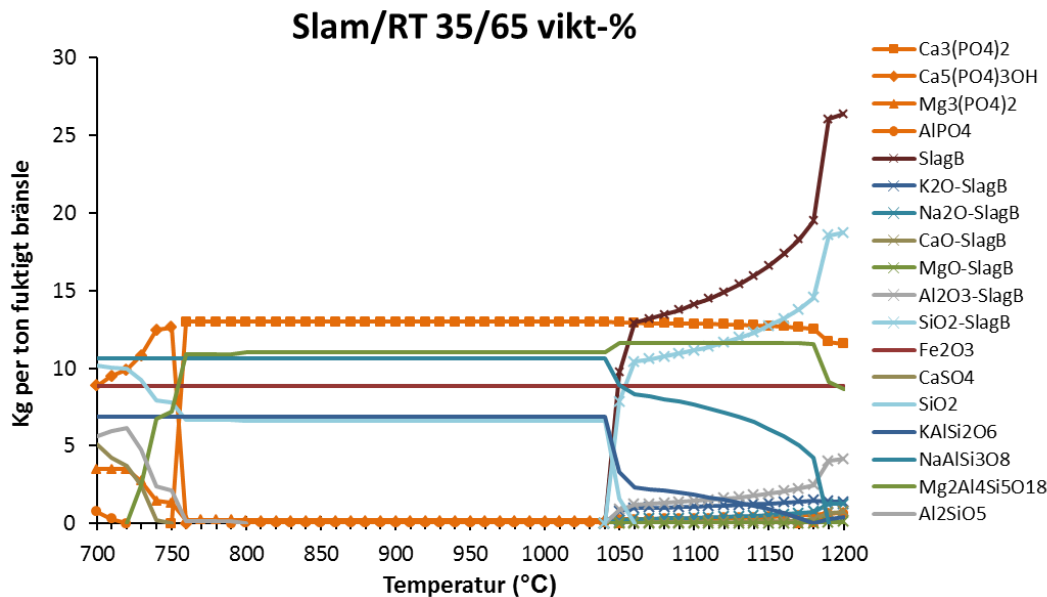
Beräkningar i FactSage 6.4 sammanfattas i Figur 5-Figur 7. De visar att fosfatbildningen ger termodynamiskt stabila föreningar direkt vid slaminblandning (orange färg används för samtliga fosfor-innehållande föreningar). Kalciumfosfater av whitlockite-typ, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, bör vara en dominant förening i aska från slambränsleblandningar medan det för ren RT-flis främst bör bildas hydroxyapatit, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$. Andra fosfater som ska vara termodynamiskt stabila när slam blandas in med RT-flisen är AlPO_4 och $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$. Empiriskt sett bildas fosfater inkluderande både magnesium och kalcium, men bristen på termodynamiska data för sådana föreningar gör att de inte kan modelleras här. Som kan utläsas i Figur 6-Figur 7 så bör enligt beräkningarna whitlockite omvandlas till hydroxyapatit när askan från slambränsleblandningarna svalnar.

Vidare kan man se att den initiala slaggbildningen sker vid en lägre temperatur för ren RT-flis än för de två olika slaminblandningarna. Omvänt innebär det också att aska som delvis smält vid de höga förbränningstemperaturerna är flytande under en längre tidsperiod vid förbränning av RT-flis. Denna smälta förväntas till största delen ha stelnat vid 1020 °C och helt ha stelnat under 930 °C för RT-flis (Figur 5) men vid slaminblandning ska slaggen ha stabiliserats till fast fas redan vid 1040 °C.



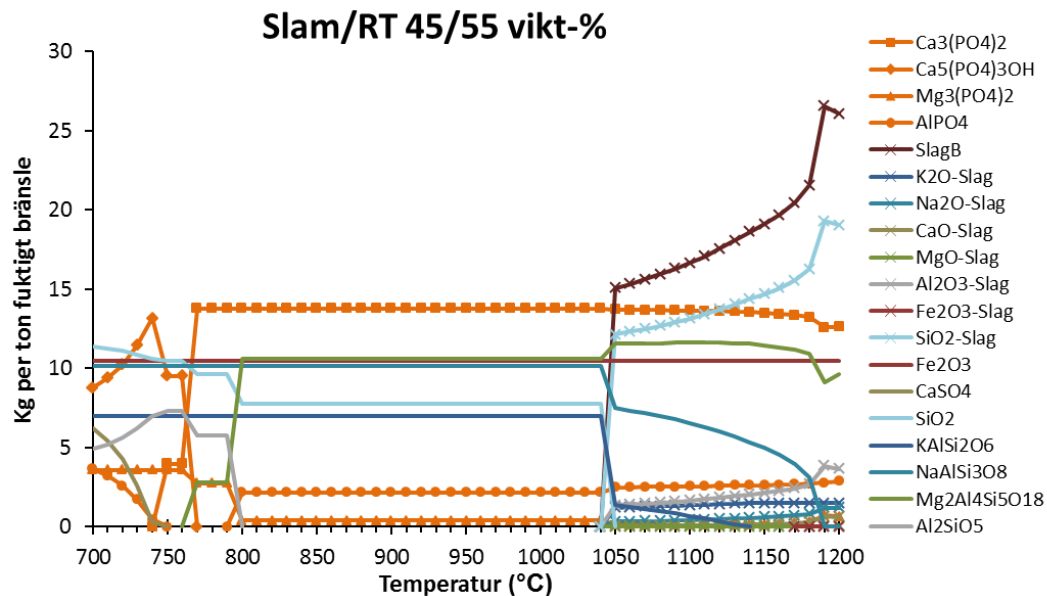
Figur 5. Resultat av termodynamiska jämviktsberäkningar för RT-flis med avseende på slaggbildning och fasta faser. Läs från höger till vänster för att se vad som sker när askan svalnar. Fosfat-föreningar: orange färg.

Figure 5. Results from thermodynamical equilibrium calculations for demolition wood regarding slag and ash. The graph is read from right to left to see how the ash and slag changes during cooling. Phosphorus-containing compounds: orange colour.



Figur 6. Resultat av termodynamiska jämviktsberäkningar för 35 vikts-% rötslam och 65 vikts-% RT-flis med avseende på slaggbildning och fasta faser. Grafen läses från höger till vänster för att se vad som sker när askan svalnar. Fosfat-föreningar: orange färg.

Figure 6. Results from thermodynamical equilibrium calculations regarding slag and ash for the fuel mixture of sludge (35 w-%) and demolition wood (65 w-%). The graph is read from right to left to see the changes during cooling. Phosphorus compounds: orange.



Figur 7. Resultat av termodynamiska jämviktsberäkningar för 45 vikts-% rötslam och 55 vikts-% RT-flis med avseende på slaggbildning och fasta faser. Grafen läses från höger till vänster för att utläsa vad som sker när askan svalnar. Fosfat-föreningar: orange färg.

Figure 7. Results from thermodynamical equilibrium calculations regarding slag and ash for the fuel mixture of sludge (45 w-%) and demolition wood (55 w-%). The graph is

read from right to left to see the changes during cooling. Phosphorus compounds: orange colour.

4.2 Förbränning

Observationer och driftdata för emissioner vid proveldningarna redovisas.

4.2.1 Observationer

Vid förbränningsförsöken gjordes följande praktiska observationer:

- Inledningsvis var det problem med att slambränsleblandningar fastnade i bränslestupen. Detta rättade till sig när man justerat inställningarna för bränslematningen i bränslestupen.
- Vid förbränning av slambränsleblandningar behövdes ett högre flöde av inkastningsluft ("spreader"-luft) vid bränsletillförsel till pannan, jämfört med vid referensfallet. Likaså behövdes ett högre flöde av primärluft för att upprätthålla god förbränning.
- Vid den högre slaminblandningen blev NO_x-halten hög och halten förvärrades av att man blev tvungen att minska NH₃-insprutningen via SNCR-systemet, på grund av att pannan kylades av det fuktiga bränslet.
- Personal i kontrollrummet upplevde inte att det var någon skillnad att köra pannan med de olika slamhalterna, annat än att emissionerna av SO₂, NO_x och HCl ökade. Driftpersonal som ronderade anläggningen sa dock att högre inblandning av slam gav problem med att det bildades högar på rostern, vilket kan leda till dålig omblandning och stråkbildning.
- Med en högre inblandning av slam gick det något fortare att ta ut flygaskeproverna, det kändes som att det kom mer flygaska.
- Sotningen var avstängd under försöken, men slagverken gick i elfiltret. Personalen vågade inte stänga dessa. De trodde inte att det satt så mycket gammal aska i filtren, och att vi skulle få problem att få ut tillräckligt med aska till våra prover med slagverken avstängda.
- Driftpersonalen upplevde att bränsleblandningen med högre andel slam luktade mer än vid eldning av andra bränslen.
- Det fanns större klumpar i bottenaskan från förbränning av bränslet med den högre inblandningen av slam.

4.2.2 Emissioner

I tabell 4 visas fukthalt och syrehalt i utgående rökgas, samt emissioner. Mätningarna kommer från anläggningens ordinarie mätsystem för emissioner ut från skorsten, det vill

säga efter rökgasreningen. Dessa data visar att vid förbränning med slambränsleblandningar blev fukthalten i rökgasen högre och emissionerna ökade för NO_x , N_2O (lustgas), SO_2 och HCl .

Tabell 4. Emissioner. TOC = "Total Organic Carbon", gasformiga kolväten, omräknat till koncentrationen av kol. $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ presenterade som NO_2 .

Table 4. Emissions. TOC = Total Organic Carbon, gaseous hydrocarbons, presented as the concentration of carbon. $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$, presented as NO_2 .

	RT	35/65 mix	45/55 mix
Fukt (%)	11,2	12,7	12,6
O_2 (% fuktig gas)	8,2	8,5	8,8
CO (mg/MJ tillfört bränsle)	33	30	18
TOC (mg/MJ tillfört bränsle)	<1	<1	<1
Stoft (mg/MJ tillfört bränsle)	<1	1	3
NO_x (mg/MJ tillfört bränsle)	32	57	78
NH_3 (mg/MJ tillfört bränsle)	<1	<1	<1
N_2O (mg/MJ tillfört bränsle)	9	11	12
SO_2 (mg/MJ tillfört bränsle)	9	>79	>78
HCl (mg/MJ tillfört bränsle)	<1	2	2

4.3 Analyser av askor

I Figur 8 visas bilder på bottenaska. I alla tre bränslefallen blev bottenaskan grusliknande. I fallen med slambränsleblandningar förekom också några klumpar av agglomererade askfragment. Det fanns en tendens till att antalet agglomerat och dess storlek ökade med ökad inblandning av slam i förhållande till RT-flis. I Figur 9 visas exempel på en klump. Klumparna var porösa och enkla att sönderdela för hand. Flygaskan hade, som förväntat, en mer mjölig struktur, se Figur 12.



Figur 8. Bottenaskor från de tre proveldningarna. Antalet agglomerat och storleken på dem ökade med en ökad inblandning av slam till RT-flis.

Figure 8. Bottom ashes from the different combustion cases. The number of agglomerates and the size of them increased with an increase of sewage sludge to the fuel mixture.



Figur 9. Exempel på en klump av bottenaska från förbränning av 45 % slam och 55 % RT-flis. (Bredvid provet finns en 10-krona.)

Figure 9. An example of a lump of bottom ash, from combustion of 45 % sewage sludge and 55 % wood waste. (Beside the sample there is a Swedish 10 kr coin.)

4.3.1 Svavel, klor, fosfor och metaller i askor

I Tabell 5 visas bottenaskornas innehåll av svavel, klor, fosfor och metaller. Bottenaskan från förbränning av slambränsleblandning med 35 % slam innehåller 22 300 -29 300 mg fosfor/kg, d.v.s. 2,2-2,9 %. Blandningen med 45 % slam gav bottenaska med 3,8-3,9 % fosfor. Förbränning av RT-flis gav bottenaska med en tiondel av fosforhalten i slambränsleblandningen med 35 % slam.

Tabell 5. Bottenaskornas sammansättning, presenterat i mg/kg TS (torrsubstans).

Table 5. Composition of the bottom ashes, presented in mg/kg ds (dry substance).

	RT 1	RT 2	RT 3	35/65 mix 1	35/65 mix 2	35/65 mix 3	35/65 mix 4	45/55 mix 1	45/55 mix 2	45/55 mix 3
S	2 060	3 370	3 070	2 960	1 360	2 180	1 890	2 000	2 000	1 670
P	3 030	2 010	1 960	24 500	22 300	25 800	29 300	39 100	38 600	38 000
Cl	11,9	11,5	39,0	89,3	11,9	11,6	11,5	10,9	121	101
Ca	72 700	62 900	60 500	59 100	45 500	57 600	58 000	73 000	73 200	68 100
Al	19 900	23 100	18 200	21 200	12 500	17 800	19 000	23 900	24 900	19 000
Fe*	14 900	14 400	14 300	28 100	28 300	27 200	28 500	36 000	37 000	35 200
Fe*	9 170	8 450	8 060	16 500	18 900	29 500	23 800	19 400	18 200	21 900
Mg	9 780	8 470	8 960	8 570	6 530	7 780	8 570	9 040	9 590	8 550
Zn*	2 680	23 800	8 030	1 700	850	1 220	1 010	1 120	2 640	750
Zn*	6 360	4 900	3 310	3 170	1 140	1 980	1 160	2 340	1 400	9 570
K	12 400	8 100	7 800	7 340	2 550	4 560	4 150	5 840	5 910	4 550
Na	4 600	3 830	3 920	3 540	2 480	3 140	3 050	3 790	3 850	3 360
Mn	1 330	1 520	1 100	790	440	590	530	630	670	740
Cu*	544	582	1 510	467	257	401	339	362	797	420
Cu*	960	370	500	500	1 780	410	700	680	720	860
Pb	398	582	1 050	212	81	167	163	257	377	275
Cr	52	57	53	22	17	28	64	18	18	30
As	48	45	44	16	10	20	16	18	15	10
Ni	<43	< 40	<33	18	13	19	15	<30	21	<32
Co	11	10	7,3	6,4	5,9	8,0	5,5	6,3	5,5	5,4
Mo	0,80	2,6	1,7	5,7	7,0	12	8,4	6,6	10	6
Cd	0,35	0,44	0,50	0,20	<0,87	<1,4	<0,99	1,2	0,3	0,1

* Analys med ICP-AES

** Analys med ICP-MS

Askornas innehåll av svavel varierade mellan 0,1 och 0,3 %, det går dock inte att urskilja någon skillnad mellan bottenaskorna från de olika bränsleblandningarna. Klorinnehållet i askorna varierade mellan olika prover, 11-121 mg/kg ts, vilket avspeglar variationer i klorhalt i RT-flisen.

Flygaskans innehåll visas i Tabell 6. Jämfört med bottenaska så innehåller flygaskan från förbränning av slambränsleblandningar något lägre koncentration av fosfor. Svavelkoncentrationen är dock ca 10 gånger högre i flygaskan jämfört med bottenaskan och klorkoncentrationen är mer än 100 gånger högre i flygaskan jämfört med bottenaskan för slambränsleblandningarna. Vidare så minskar koncentrationen av fosfor och klor i flygaska i förhållande till bottenaska med en ökad inblandning av slam till RT-flis.

Kalcium hade högst koncentration bland metallerna i såväl bottenaska som flygaska. Dock skall noteras att analysen av kisel misslyckades, annars skulle kisel enligt bränsleanalysen (Tabell 2), haft den högsta koncentrationen. Askorna från slambränsleblandningsförsöken har ett högre innehåll av järn än försöken med RT-flis (ett av flygaskeproven har en mycket hög halt av järn, vilket antas bero på någon förorening från RT-bränslet). För kalium och natrium finns en tendens till lägre halter i bottenaska vid förbränning av slambränsleblandningar jämfört med RT-flis. Vidare observeras en spridning i resultaten, som en konsekvens av den ingående RT-flisens naturliga variation i sammansättning.

Tabell 6. Flygaskornas sammansättning, presenterat i mg/kg TS (torrsubstans).

Table 6. Composition of the fly ashes, presented in mg/kg ds (dry substance).

	RT 1	RT 2	RT 3	35/65 mix 1	35/65 mix 2	35/65 mix 3	35/65 mix 4	45/55 mix 1	45/55 mix 2	45/55 mix 3
S	31 100	34 000	40 300	21 000	19 300	20 300	19 500	21 300	23 300	19 700
P	9 100	9 290	9 610	18 500	22 200	23 700	26 300	25 700	27 500	27 400
Cl	44 800	54 200	61 800	27 100	26 500	32 900	35 700	31 500	33 300	36 100
Ca	127 700	132 200	132 800	97 900	94 900	92 700	91 800	96 600	96 000	88 100
Al	24 900	25 600	23 700	30 600	31 500	31 200	28 900	33 700	33 300	29 900
Fe*	20 100	21 000	21 700	33 100	35 400	36 100	37 700	37 600	38 700	37 300
Fe**	15 800	15 900	15 200	17 500	290 400	20 500	27 500	21 900	24 200	20 400
Mg	16 200	16 900	17 300	14 400	14 300	13 800	13 700	14 300	14 000	13 200
Zn*	27 400	32 500	39 100	23 700	25 600	28 900	30 300	29 700	35 100	32 300
Zn*										
*	26 300	28 300	34 500	19 000	25 100	24 200	28 400	23 700	30 700	27 700
K	60 600	68 900	78 200	37 000	33 900	34 700	34 600	35 200	36 700	35 000
Na	12 500	15 500	16 700	8 700	8 880	9 230	10 050	9 040	9 230	9 220
Mn	3 340	3 570	3 750	2 430	2 270	2 250	2 150	2 300	2 290	2 090
Cu*	470	580	630	450	520	560	630	600	650	660
Cu*										
*	452	504	562	332	493	431	530	443	550	489
Pb	1 400	1 760	1 830	1 260	1 640	1 590	1 870	1 820	2 120	2 160
Cr	187	189	220	88	112	84	103	130	89	75
As	909	920	1 170	408	534	492	596	410	558	484
Ni	<46	40	<45	30	42	35	40	33	<25	32
Co	16	17	16	12	16	12	15	12	14	11
Mo	16	23	22	16	21	20	24	16	18	19
Cd	71	81	90	38	44	42	46	42	52	48

* Analys med ICP-AES

** Analys med ICP-MS

4.3.2 XRD-analyser av föreningar i askorna

Resultatet från XRD-analysen av askorna presenteras nedan i Tabell 7 och Tabell 8 med kemisk beteckning och mineralnamn för de föreningar som identifierats. Föreningarna anges med vikt-% baserat på Rietveldförfining. De föreningar som ligger under 5 vikt-% kan anses ligga på mycket låga nivåer i det kristallina materialet, d.v.s. de kan identifieras men ger inget större bidrag till den totala asksammansättningen.

Tabell 7. XRD-analyser av bottenaska, vikt-%.

Table 7. XRD analysis of bottom ash, weight-%.

	RT 1	RT 2	RT 3	35/65 mix 1	35/65 mix 2	35/65 mix 3	35/65 mix 4	45/55 mix 1	45/55 mix 2	45/55 mix 3
Fosfater										
Ca ₅ (PO ₄)OH (Hydroxyapatit)		1		2	2	2	2	2	2	4
Ca ₉ KMg(PO ₄) ₇ (Whitlockite)	10	8	9	10	1	18	2	1	1	2
Ca _{2,71} Mg _{0,29} (PO ₄) ₂ (Whitlockite)	6			4	17	6	13	24	22	20
Sulfater										
Ca ₂ SO ₄ (Anhydrit)										2
K ₂ SO ₄ (Arkanit)				2	3	2	1	2		
Silikater										
CaAlSi ₂ O ₈ (Anortit)			4							
(Na,Ca)Al(Al,Si) ₃ O ₈ (Albit, kalcium inlöst)	26	19	4	18	22	20	32	15	12	15
NaAlSi ₃ O ₈ (Albit)		11	21	8						
KAlSi ₃ O ₈ (Mikroklin)	12	11	12	7	7	4	4	3	8	5
KAlSiO ₄ (Kalsilite)										1
SiO ₂ (Kvarts)	36	40	39	34	32	27	30	26	35	27
Karbonater										
CaCO ₃ (Kalcite)	3	7	7	2	1	2	2	5	2	3
Oxider										
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	7	2	3	5	6	6	7	11	10	11
Fe ₂ O ₃ (Maghemite)				5	7	11	6	8	7	9
MgO (Periklas)				2	2	2	1	2	1	
Totalt	100	99	99	99	100	100	100	99	100	99

Den viktigaste informationen från dessa analyser är inte de exakta mängderna av respektive förening, eftersom mängderna varierar beroende på bränsleinblandning och andel amorft respektive kristallint material i det specifika provet. Snarare bör resultaten tolkas utifrån

vilka föreningar som bildas vid eldning av ren RT-flis och hur den asksammansättningen förändras vid inblandning av rötslam.

Tabell 8. XRD-analyser av flygaska, vikt-%.

Table 8. XRD analysis of fly ash, weight-%.

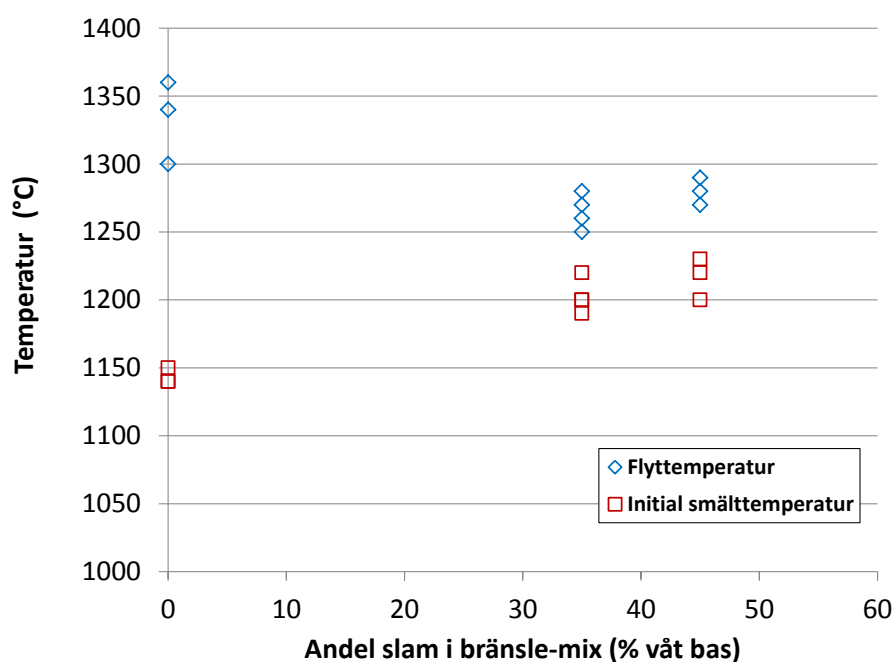
	RT 1	RT 2	RT 3	35/65 mix 1	35/65 mix 2	35/65 mix 3	35/65 mix 4	45/55 mix 1	45/55 mix 2	45/55 mix 3
Fosfater										
Ca ₅ (PO ₄)OH (Hydroxyapatit)	13	16	12	7	7	7	9	6	6	6
Ca ₉ KMg(PO ₄) ₇ (Whitlockite)					9					4
Ca _{2,71} Mg _{0,29} (PO ₄) ₂ (Whitlockite)				5	10	8	8	7	7	6
Sulfater										
Ca ₂ SO ₄ (Anhydrit)	13	12	14	8	10	8	8	9	9	8
K ₂ SO ₄ (Arkanit)				3	5	6	9		6	6
K ₃ Na(SO ₄) ₂ (Aphthalit)	5	5	4	4	3	5	6	7	4	4
Silikater										
(Na,Ca)Al(Al,Si) ₃ O ₈ (Albit, kalcium inlöst)	12	14	9	12	10	10	13	12	15	16
KAlSi ₃ O ₈ (Mikroclin)	6	5	7	14	6	15	12	19	11	13
KAlSiO ₄ (Kalsilite)								2		
SiO ₂ (Kvarts)	18	19	13	28	26	25	21	19	23	21
Klorider										
KCl (Sylvit)	11	11	13	4	3	3	2	1	1	1
NaCl (Halit)	5	5	8	3	3	3	3	3	3	2
Karbonater										
CaCO ₃ (Kalcite)	13	12	12	9	6	7	4	7	6	3
Oxider										
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	3		4	3	2	4	4	6	6	6
Fe ₂ O ₃ (Magemite)								3	3	3
CaO (Bränd kalk)		2	1							
MgO (Periklas)			2				1			
Totalt	99	101	99	100	100	101	100	101	100	99

I bottenaskan, Tabell 7, domineras de fosforinnehållande föreningarna av fosfater av whitlockite-typ. Sammansättningen är ungefär densamma vid de två olika inblandningsgraderna av rötslam, men andelen fosfater i det kristallina materialet ökar vid den högre slamblandningen. Spårmängder av sulfater dyker också upp i de flesta

proverna vid slaminblandning. I flygaskan, Tabell 8, bildas en betydligt högre andel hydroxyapatit, och vid förbränning av ren RT-flis förekommer all kristallin fosfor som hydroxyapatit. Vid slaminblandning ser man även här att fosfater av whitlockite-typ bildas vilket resulterar i en jämn fördelning av fosfor mellan hydroxyapatit och whitlockite.

4.3.3 Asksmältförlopp

I Figur 10 visas bottenaskornas asksmältförlopp med avseende på initial smälttemperatur och flyttemperatur. RT-bottenaskan har lägst initial smälttemperatur, medan bottenaskan från slambränsleblandningarna har lägre flyttemperaturer än RT-bottenaskan. Skillnaden i flyttemperatur är dock inte så stor, cirka 50 °C.



Figur 10. Asksmältförlopp för bottenaskor.

Figure 10. Ash melting of bottom ashes.

4.4 Utvinning av fosfor

Den del av askproverna som gick vidare till labförsöken med fosforprocessen innehöll inga större klumpar. I Figur 11-Figur 12 visas bilder på askproven. Siktningen av askorna visade att bottenaskorna från bägge försöken, 35 respektive 45 % slaminblandning, hade en partikelstorlek som var mindre än 2 mm. Vid en 35 %-ig slaminblandning var 85 % av materialet större än 0,5 mm emedan för askan med den 45 %-iga slaminblandningen var motsvarande andel 65 %. Flygaskan hade en storleksfördelning där ca 70 % av materialet var mindre än 0,5 mm.

I Tabell 9 nedan redovisas innehållet av olika ämnen i askorna som medelvärden och medianvärden för slambränsleblandning med 35 % respektive 45 % inblandning av slam. I Tabell 5 och Tabell 6 redovisas innehållet i askorna för respektive prov. Fosforinnehållet i bottenaska var 26 g/kg aska vid förbränning av slambränsleblandning med 35 % slam,

vilket motsvarar 2,6 % fosfor. Vid den högre slamblandningen innehöll bottenaskan 3,9 % fosfor. Bottenaskornas koncentration av järn var ungefär lika hög som för fosfor och innehållet av kalcium var ungefär dubbelt så högt. Sett till molär koncentration låg järn på 0,5-0,7 mol/kg, fosfor på ca 0,9-1,3 mol/kg och kalcium på 1,5-1,8 mol/kg.



Figur 11. Bottenaska från förbränning av slambränsleblandning, prov till utvinning av fosfor.

Figure 11. Bottom ash from combustion of sewage sludge mixture, sample for extraction of phosphorous.



Figur 12. Flygaska från förbränning av slambränsleblandning, prov till utvinning av fosfor.

Figure 12. Fly ash from combustion of sewage sludge mixture, sample for extraction of phosphorous.

Tabell 9. Askornas innehåll av fosfor och andra huvudelement, enhet g/kg. Medelvärden och medianvärden. Mer detaljerade uppgifter i Tabell 6.

Table 9. Composition of phosphorous and other main elements in the ashes, as g/kg. More detailed information in Table 6.

	P	Fe	Al	Ca	Cu	K	Mg	Mn	Na	S
Bottenaska										
35/65 mix medel	26,54	27,94	19,36	58,23	0,54	5,35	8,31	0,64	3,24	2,34
35/65 mix median	25,76	28,11	19,03	58,04	0,50	4,56	8,57	0,59	3,14	2,18
45/55 mix medel	38,55	36,07	22,58	71,41	0,75	5,43	9,06	0,68	3,67	1,89
45/55 mix median	38,56	36,02	23,86	72,95	0,72	5,84	9,04	0,67	3,79	2,00
Flygaska										
35/65 mix medel	22,65	35,55	30,55	94,32	0,54	35,06	14,05	2,28	9,22	20,03
35/65 mix median	22,92	35,72	30,86	93,80	0,54	34,67	14,05	2,26	9,06	19,89
45/55 mix medel	26,89	37,86	32,29	93,56	0,64	35,62	13,81	2,23	9,16	21,43
45/55 mix median	27,44	37,61	33,26	95,96	0,65	35,18	13,97	2,29	9,22	21,25

Upplösningsgraden för de olika ämnena visas i Tabell 10. Värdena redovisas i form av medelvärde och som medianvärde. I bilaga B redovisas alla mätvärden. För fosfor uppnåddes som medelvärde 89 respektive 82 % upplösningsgrad i bottenaskan (vid 35 respektive 45 % slamblandning). För flygaska var upplösningsgraden lägre, vid 35 % inblandning av slam var medelvärdet 86 % och vid 45 % inblandning av slam var det 69 %. Upplösning av järn var betydligt lägre, medan upplösning av kalcium var nästan lika hög

som för fosfor. I Tabell 11 visas de extraherbara mängderna av olika ämnen, d.v.s. hur stor andel av respektive ämnen som extraherades ur askan.

För upplösta bottenaskor beräknades mängden utfällt monoammoniumfosfat (MAP) respektive gips. I Tabell 12 redovisas resultaten av innehåll av oönskade ämnen i ammoniumfosfat, vilket var <0,01 mg kadmium/kg och mindre än 10 mg/kg för koppar, nickel och zink. I Tabell 13 presenteras mängden oönskade ämnen i gips.

Tabell 10. Uppnådd upplösningsgrad, presenterad i vikt-% avseende respektive ämne.

Table 10. Achieved solution degree, presented in weight-% of respective element.

	P	Fe	Al	Ca	Cu	K	Mg	Mn	Na	S
Bottenaska										
35/65 mix medel	89	37	45	92	82	55	72	68	57	68
35/65 mix median	*	37	47	93	*	55	73	66	57	*
45/55 mix medel	82	20	57	71	63	77	75	78	74	19
45/55 mix median	82	19	56	71	61	78	74	78	75	19
Flygaska										
35/65 mix medel	86	33	40	84	56	51	71	65	51	52
35/65 mix median	87	37	37	90	54	47	70	66	48	61
45/55 mix medel	69	18	52	63	57	70	69	72	66	17
45/55 mix median	74	19	56	69	63	78	75	77	74	17

* Vissa värden från analysen har varit avvikande/orimliga varför endast två mätvärden varit tillgängliga och medianvärdet därför ej kunnat beräknas

Tabell 11. Extraherbara mängder för respektive ämne, i vikt-% med avseende på askan.

Table 11. Extractable amounts for respective element, weight-% with respect to the ash.

	P	Fe	Al	Ca	Cu	K	Mg	Mn	Na	S
Bottenaska										
35/65 mix medel	2,44	1,04	0,87	5,36	0,04	0,29	0,60	0,04	0,18	0,17
35/65 mix median	*	1,05	0,83	5,41	*	0,25	0,63	0,04	0,18	*
45/55 mix medel	3,41	1,38	0,80	6,49	0,04	0,24	0,65	0,04	0,17	0,12
45/55 mix median	3,39	1,42	0,77	6,43	0,04	0,24	0,64	0,04	0,16	0,12
Flygaska										
35/65 mix medel	1,84	0,70	1,73	6,68	0,03	2,72	1,06	0,18	0,68	0,38
35/65 mix median	1,85	0,71	1,71	6,63	0,03	2,68	1,05	0,18	0,68	0,37
45/55 mix medel	1,84	0,67	1,68	5,95	0,04	2,48	0,95	0,16	0,60	0,36
45/55 mix median	2,03	0,74	1,87	6,66	0,04	2,74	1,07	0,18	0,67	0,40

* Vissa värden från analysen har varit avvikande/orimliga varför endast två mätvärden varit tillgängliga och medianvärdet därför ej kunnat beräknas

I Tabell 14 visas en översikt på in- och utgående komponenter (exkl. ingående svavelsyra, saltsyra och kalk) för upplösningsförsöken på bottenaska. För blandningen med 35 % slam visar tabellen att 1000 kg aska gav 94 kg monoammoniumfosfat (fosforgödselmedel innehållande 26 % fosfor), 299 kg fällningskemikalier, 499 kg gips och 3 kg tungmetallsulfider. Motsvarande för bränsleblandningen med 45 % slam var 131 kg monoammoniumfosfat, 358 kg fällningskemikalier, 571 kg gips och 3 kg tungmetallsulfider. Tungmetallsulfider är en restprodukt som ska deponeras. Övriga produkter är

fällningskemikalier att användas i reningsverk för fosforfällning, samt gips att använda i olika applikationer.

Tabell 12. Innehållet av tungmetaller i ammoniumfosfaten (MAP) från slamaska.

Table 12. Content of heavy metals in the ammonium phosphate (MAP) from sewage sludge ash.

Element	mg/kg	%
Cd	<0,01	< 0,000001 %
Cu	<10	< 0,001 %
Ni	<10	< 0,001 %
Zn	<10	< 0,001 %

Tabell 13. Innehåll av oönskade ämnen i gips från slamaska.

Table 13. Content of contaminations in gypsum from sewage sludge ash.

Element	mg/kg
As	<1
Cd	<0.09
Co	<0.09
Cr	<0.5
Cu	<2
Hg	<0.2
Ni	<0.7
Pb	0.942

Tabell 14. Översikt på in- och utgående komponenter, baserat på resultaten av utvinning av fosfor ur bottenaska.

Table 14. Overview of input and output, based on the results of extraction of phosphorous from bottom ash.

	Mix 35/65	Mix 45/55
Input		
Aska	1 000	1 000
Svavelsyra (96%)	*	*
Saltsyra (36%)	*	*
Kalk	*	*
Natriumsulfid	2	2
Ammoniak	11	16
Output		
Mono-ammoniumfosfat MAP (26% P)	94	131
Fällningskemikalier	299	358
Gips	499	571
Tungmetallsulfider	3	3
Processvatten	*	*

* sekretessbelagda data

5 Resultatanalys

De uppnådda resultaten har analyserats och diskuteras med avseende på förbränning av slambränsleblandningarna och efterföljande labförsök med process för fosforutvinning ur aska. Därtill görs en diskussion med ett systemperspektiv av systemet med samförbränning av avloppsslam i befintliga förbränningsanläggningar med efterföljande fosforutvinning ur askan. Diskussionen innefattar bland annat ekonomi, energi och miljö i jämförelse med slamspridning på åkermark och sluttäckning av deponi med avloppsslam.

5.1 Förbränning

Vid förbränning av slambränsleblandningar blev fukthalten i rökgasen högre och det bildades mer NO_x , N_2O (lustgas), NH_3 , SO_2 och HCl . De ökade halterna av kväveföreningarna och SO_2 beror på högre halter av kväve respektive svavel i slambränsleblandningarna. Den förhöjda NO_x -halten är inte problematisk sett till anläggningens gränsvärde för NO_x , men den medför en ökad kostnad genom ökad avgift i NO_x -avgiftssystemet. Ökningen i SO_2 var däremot så hög att den låg utanför mätområdet för anläggningens stationära instrument och den innebar högre halter än gränsvärdet för SO_2 . För framtida eldning av slambränsleblandningar skulle det därför vara nödvändigt att förbättra rökgasreningen m.a.p. SO_2 , vilket skulle innebära såväl en investeringskostnad som ökade rörliga kostnader för åtgång av kemikalier vid rening. Den ökade halten av HCl beror troligen på att kalium i mindre utsträckning bildar KCl i fallen med slambränsleblandningar och istället reagerar med svavel, fosfor och aluminiumsilikater som finns i slammet, vilket är positivt med avseende på korrosion. Gällande risk för slaggningsavbädd så indikerade både resultaten från asksmältförlopp av bottenaska och termodynamiska jämviktsberäkningar att benägenheten till slaggningsavbädd minskade vid inblandning av slam till bränslet. Vidare har en lägre förekomst av alkaliklorider observerats i flygaskan vilket indikerar en mindre korrosiv flygaska.

5.1.1 Fosfors väg på förbränningsanläggningen

I bilaga A görs en uppskattning av mängden fosfor in till pannan utifrån de utgående mängderna fosfor i flygaska respektive bottenaska. Utifrån uppgifter från ENA Energi utgår vi från att 80 % av askan går ut som bottenaska och 20 % i form av flygaska. Som en kontroll av rimligheten i uppskattningen görs också en uppskattning av den ingående mängden fosfor utifrån bränsleanalysen och pannans drift. De två uppskattningarna av ingående mängd fosfor till pannan ger ett likvärdigt resultat. Beräkningarna visar också att drygt 80 % av fosfor återfinns i bottenaskan och att det finns en tendens till att andelen fosfor i bottenaskan ökar med en ökad inblandning av slam (bilaga A).

5.1.2 Termodynamiska jämviktsberäkningar

De termodynamiska jämviktsberäkningarna gav en ganska god bild av i vilken kemisk form fosfor skulle återfinnas i askan. Mängden fosfat underskattades sannolikt i fallet med enbart RT-flis vilket kan vara avhängigt variationer i bränslet. Eftersom fosfaterna som bildades i förbränningsförsöken har en hög smältpunkt i överensstämmelse med beräkningarna gav slaggningsmodellen FT-Oxid-SlagB, vilken främst tar hänsyn till silikater, relativt goda resultat vid jämförelse med analysen av asksmältförloppet. Slaggen som bildas är alltså sannolikt silikatdominerad. Enligt beräkningarna skulle slaggbildningen ske vid en lägre temperatur för RT-flis och i fler steg än när slam blandats in, vilket även återspeglas i

analysen av asksmältförloppet. Det kan därför ses som rimligt att rekommendera termodynamiska jämviktsberäkningar som ett tidigt stöd för andra anläggningsägare som vill ta in röttslam som stödbränsle och ska utvärdera hur det fungerar med basbränslet.

Hur fosfor är bundet i askan inverkar på kostnaden för utvinning, både när det gäller hur stor andel som kan utvinnas och vad gäller kemikalieåtgång. I bottenaskfraktionerna dominerade fosfater av whitlockite-typ ($\text{Ca}_{3-x}\text{Mg}_x(\text{PO}_4)_2$ och $\text{Ca}_9\text{KMg}(\text{PO}_4)_7$) och där nådde man också en högre utvinningsgrad än för flygaska där den mer svårlösta föreningen hydroxyapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)\text{OH}$) kunde återfinnas.

5.2 Fosforutvinning

Askorna från försöken hos ENA Energi uppvisade en totalhalt av fosfor om 2,6 % respektive 3,9 % för den lägre respektive den högre slamblandningen. Fosforhalten i askan ifrån ett liknande samförbränningsförsök, som genomförts av Ragn-Sells tillsammans med Uddevalla Energi, var 4 %. Vid försöket i Uddevalla var inblandningen 30 % slam till 70 % träflis och förbränningen skedde i en biobränsleeldad rosterpanna. Den största anledning till att fosforhalten i askan blev lägre i Enköping är att slammet här blandats med RT-flis och att man i Uddevalla blandat med träflis. RT-flis har en högre askhalt (i detta arbete 5,7 % ts) än träflis (<1 %). Det högre asktillskottet ifrån ”blandningsbränslet” resulterar i en högre spädningseffekt vilket ger en lägre fosforhalt i askan.

Bottenaskan i detta arbete blev relativt porös och enkel att sönderdela, till skillnad från försöken i Uddevalla. Upplösningsgraderna för bottenaskan var i detta arbete runt 90 %, vilket är högre än i Uddevallaförsöket (75 %) och kan bero på Uddevallaaskans hårdare struktur.

Om man jämför flygaska och bottenaska så visade flygaskan en lägre upplösningsgrad än bottenaskan, vilket beror på att den förbrukar mer syra och ger ett högre slut-pH efter upplösningen. Detta kan justeras genom en ökad syratillförsel vid upplösningen. Erfarenheter från upplösningsförsök med olika typer av slamaskor är att upplösningsgraden för fosfor varierar från 75 % till mer än 96 %. Den lägre upplösningsgraden av fosfor i flygaska jämfört med bottenaska bekräftas även av de termodynamiska jämviktsberäkningarna, som visar på att fosfaten i flygaskan till stor del föreligger som svårlöslig hydroxyapatit.

Massbalansen beräknad utifrån dessa tester återspeglar de lägre halterna av fosfor och järn samt den något högre halten av aluminium. Förbrukningen av svavelsyra i processen är bl.a. beroende av mängden extraherbart kalcium i askan vilket bildar gips vid tillförsel av svavelsyran. Den totala syraförbrukningen i systemet är beroende av askans sammansättning i stort samt av mängden upplöst järn och aluminium, d.v.s. den mängd som skall tas ut ur processen i form av fällningskemikalier. Åtgången av ammoniak som används för produktion av ammoniumfosfat står i proportion till mängden fosfor som extraheras.

Innehållet av kadmium i den producerade ammoniumfosfaten är lågt, < 1 mg Cd/kg P, vilket kan jämföras med det svenska gränsvärdet för kadmium som är 100 mg Cd/kg P [21]. Kadmiuminnehållet i fosforgödselmedel sålda i Sverige år 2010 var i genomsnitt 6 mg Cd/kg P [22], medan man i Europa i genomsnitt har ett betydligt högre kadmiuminnehåll i

fosforgödselmedel. Ett medelvärde på 83 mg Cd/kg P redovisades i ett arbete år 2008 [23]. När det gäller kadmiuminnehåll i avloppsslam så var medelvärdet för det slam som ingick i Revaq-certifieringen för år 2012 ca 26 mg Cd/kg P [24].

De variationer som återfinns i resultaten kan bero på naturliga variationer i bränslets sammansättning, samt att provmängden generellt varit liten.

Efter utvinning av fosfor med EasyMining Sweden's metod för slamaska finns en askrest. Den utgörs av aska som inte lösts upp i processen och kan likställas med andra konstruktionsmaterial som finns tillgängliga på marknaden. Sand, silikater m.m. som inte är lösliga i syra kommer i möjligaste mån, i konkurrens med övriga konstruktionsmaterial, att återanvändas. Med hänsyn till syratvätten kommer restmaterialet inte laka några metaller till skillnad från den obehandlade askan.

5.3 Systemperspektiv

I detta avsnitt avser vi att ur ett systemperspektiv diskutera hur systemet samförbränning av slam med RT-flis, i befintliga bioenergianläggningar, och efterföljande fosforutvinning ur askan står sig i förhållande till två andra slamhanteringsalternativ, ur ett svenskt perspektiv. De två alternativen i jämförelsen är slamspridning på åkermark och slam till sluttäckning av deponi. Diskussionen berör miljö, produktkvalitet, ekonomi och energi ur olika aspekter. Direkt spridning på åkermark används som referensfall eftersom det är den, i Sverige idag, vanligast förekommande användningen av slam där fosfor återförs till åkermarken.

Observera dock att hela diskussionen kring slambränsleblandningar ur systemperspektiv är just en diskussion och inte baserad på beräkningar. Som stöd för resonemangen används befintlig känd kunskap. Vi vill också betona att vi tror att det kommer att behövas flera alternativ för återföring av fosfor i samhällets kretslopp och att en metod inte ensam kan svara för hela lösningen.

5.3.1 Förutsättningar för de olika slamhanteringsalternativen

I Tabell 15 redovisas andelen av slammet som används i respektive fall och den potential systemet har d.v.s. hur stor andel av den svenska slammängden som systemet maximalt kan hantera.

Tabell 15. Slamhanteringsalternativen som diskuteras, deras användning idag och möjlig andel av slammet som skulle kunna hanteras med respektive system.

Table 15. The alternatives for usages of sewage sludge discussed in this work, the usage of them today, and potential use of them.

Slamhanteringsalternativ	Användning idag, andel av Sveriges slam	Potential, andel av total slammängd som skulle kunna hanteras
1) Avsättning av avloppsslam på åkermark	25 %	84 %
2) Användning av avloppsslam för sluttäckning av deponi	20 %	100 %
3) Samförbränning av avloppsslam och RT-flis samt fosforutvinning ur aska	0 %	100 %

Idag sprids en fjärdedel av allt avloppsslam på åkermark [3], medan potentialen för återföring av avloppsslam till åkermark är 84 % [1]. Den övriga mängden slam klarar ej gällande gränsvärden för att få spridas på åkern, främst avseende tungmetallhalter (kadmium). Sluttäckning av deponier förbrukar ca 20 % av allt slam och potentialen är att allt slam som idag produceras skulle kunna användas för deponitäckning.

Samförbränning av avloppsslam med fosforutvinning ur askan sker inte idag men potentialen är att 100 % av det svenska slammet skulle kunna hanteras denna väg. Idag genereras årligen ca 200 000 ton torrt slam i Sverige. En sådan bränslemängd motsvarar ungefär vad en större svensk kraftvärmelanläggning förbrukar under ett år.

Om man ser till framtiden så kan man dock förvänta sig att avsättningen för slam genom sluttäckning av deponier kommer att minska dels p.g.a. att deponierna blir färdigtäckta, men även för att sluttäckning av deponi med slam inte ger någon återföring av fosfor till åkermark. Både vid referensfallet och slambränsleblandningar med förbränning och fosforutvinning åstadkoms återföring av fosfor till åkern, vilket är viktigt eftersom fosfor är en ändlig resurs. Slamspridning på åkermark görs för endast för en fjärdedel av slammet trots att potentialen, sett till lagstiftningskrav, medger att 84 % av slammet sprids direkt på åkern. En viktig förklaring till varför så liten andel slam sprids är troligen bristen på acceptans för slamspridning på åkermark. Om slamspridning på åkermark skall kunna ökas krävs att acceptansen ökas, vilket kan ske genom att öka slammets kvalitet avseende tungmetallinnehåll och smittämnen förbättras.

När det gäller slamförbränning påstås ibland att stora investeringar krävs i förbränningsanläggningarna och att utsläppen kommer att öka [1][17], vilket inte stämmer vid förbränning av slam i befintliga anläggningar. För att få blanda in slam till förbränningen kommer det att krävas ett nytt miljötillstånd för den aktuella anläggningen. Detta tillstånd kommer med största sannolikhet inte innebära att utsläppen från anläggningen får ökas. Vid slaminblandning kommer det att bildas högre koncentrationer av föroreningar vid förbränningen vilket innebär att man vid hög inblandning av slam behöver öka kapaciteten i rökgasreningen för att ta bort ökade mängder av framförallt stoft, NO_x och SO₂. Högre kapacitet åstadkoms med befintlig och känd teknik och medför en ökad driftskostnad i anläggningen.

5.3.2 Miljö, produktkvalitet, ekonomi och energi

Nedan görs en diskussion avseende miljö, produktkvalitet, ekonomi och energi för de olika slamhanteringsalternativen. Kommentarer görs även för miljömålen Giftfri miljö och Klimatpåverkan.

Miljö

När det gäller slamspridning på åkermark tillförs åkern de ämnen som finns i slammet d.v.s. fosfor, kväve och mullämnen. Därtill finns i slammet även tungmetaller, smittämnen och läkemedelsrester. Detta innebär en risk vid spridning då oönskade ämnen tillförs livsmedelskedjan. Slamspridning på åkermark enligt dagens regelverk innebär dock en, enligt samhället, accepterad risknivå.

Avsättning av avloppsslam som täckning på avslutade deponier innebär att riskerna med slammet på åkern undviks, men ingen näringsåterföring sker.

Vid förbränning av slam förstörs smittämnen, läkemedelsrester och vid den efterföljande fosforutvinningen ur askan med EasyMining Sweden's process avskiljs tungmetaller och hamnar ej på åkern.

Kadmium är den mest aktuella och diskuterade tungmetallen i slam och genom en recirkulation av ren fosfor undviks att även kadmium recirkuleras. Kommersiella mineralfosforgödselmedel innehåller kadmium beroende på hur mycket som finns i råvaran, råfosfat/apatit. Dock skall sägas att Sverige till stor del får sitt fosforgödselmedel från apatitfyndigheter med lågt kadmiuminnehåll.

Avloppsslam består av biomassa vars ursprung är mat. När biomassa förbränns är det koldioxid neutralt. Sett ur ett förbränningsperspektiv är dock avloppsslam juridiskt klassat som ett avfall. Det blir något paradoxalt att slam idag klassas som ett avfall vid förbränning, men om det skall direkt spridas på åkermark är biomassa. Om man ser till avloppsslammets sammansättning och ursprung skulle man istället kunna förvänta sig att det betraktas som biomassa oberoende om det skall förbrännas eller spridas på åkermark.

Produktkvalitet

Fosforproduktens vattenlöslighet/växttillgänglighet är viktig för att växterna skall kunna tillgodogöra sig näringsämnet. Fosfor i slam är till ca 70 % fälld i reningsverket till vattenolöslig järn- eller aluminiumfosfat, som har en mycket låg växttillgänglighet om den sprids på åkermark. För att minska miljörisken med utlakning i samband med gödsling är det en fördel att kunna tillföra vattenlösliga gödselmedel när det finns växtlighet på åkern som direkt kan tillgodogöra sig näringen. Lågkvalitetseffekten för näringsinnehållande material som ej kan spridas i växande gröda eller i samband med sådd är således sämre.

Kväve brukar framföras som ett ämne som försvinner till luften vid förbränningen till skillnad från direkt slamspridning på åkermark. Vid tillförsel av ett ton vått avloppsslam tillförs endast 4 kg växttillgängligt kväve [1]. En enkel energiberäkning visar dock att förbränning av ett ton slam genererar betydligt mer energi än vad som åtgår för att skapa nytt mineralgödselkväve motsvarande den mängd som försvinner vid förbränningen. Kväve är inte en begränsad resurs (luften innehåller ca 78 % kväve) utan en fråga om energiinsats vid tillverkningen av mineralgödselkväve, energi som kan komma från förnybara källor. Vid förbränningen av avloppsslam avgår ca 80 % av dess kväve som N₂. Därigenom återförs slammets kväve till luften varur kvävet sedan tas vid tillverkning av mineralgödselkväve.

I fallet med deponitäckning återförs inte kväve till åkern och detsamma gäller för mullämnena. Vid förbränningen försvinner mullämnena som återförs vid direkt slamspridning på åkermark.

Ekonomi

Som nämnts tidigare så innebär anpassning till en hög inblandning av slam till förbränning en kostnad i form av ombyggnationer av förbränningsanläggningen i form av askutmatning, rökgasrening etc. och en ökad driftskostnad för rökgasrening. Vid den efterföljande fosforutvinningen ur aska produceras högvärdiga och värdefulla produkter, ammoniumfosfat, fällningskemikalier och gips, vilka skall beaktas vid en ekonomisk jämförelse av systemen. Naturvårdsverkets förslag gällande fosforåterföring via slam till

åkermark innebär att slammet måste hygieniseras, vilket även det medför en ökad kostnad för slamspridningen jämfört med idag.

Energi och transporter

När det gäller transporter och deras miljöpåverkan är det svårt i denna studie att kunna uttala sig om skillnaderna, möjligtvis kan slamförbränning tänkas bidra med fler transporter. Dock har den producerade ammoniumfosfaten, med dess höga koncentration, fördelen att den tål längre transporter och därigenom har potential att kunna återrecirkuleras till hela den svenska åkermarken, vilket inte får anses möjligt för avloppsslammet.

Avloppsslam produceras kontinuerligt över året vilket innebär att det behövs mellanlagring i väntan på spridningssäsongen, vilket kräver utrymme. Vid slamförbränning skulle avloppsslammet kunna transporteras till förbränningsanläggningen kontinuerligt.

5.3.3 Sammanfattande jämförelse av olika slamhanteringsalternativ

I Tabell 16 nedan visas en sammanfattande jämförelse av olika slamhanteringsalternativ. Med målsättning att återföringen av fosfor till åkermark skall öka som utgångspunkt är både direkt slamspridning och slambränsleblandningar med förbränning och fosforutvinning intressanta. De två slamhanteringsalternativen har potential att öka i framtiden och skulle kunna finnas parallellt. Alternativet att förbränna slam för senare utvinning av fosfor med EasyMining Sweden's metod har fördelarna att det kan hantera alla avloppsslam, mindre risk för spridning av smittämnen och läkemedelsrester till åkermark, samt högre produktkvalitet med avseende på effektivitet och flexibilitet (sprids när det passar grödan bäst). Direktspridning av slam har fördelen att det är en enkel hantering i få steg som i dagsläget inte kräver investeringskostnader och har låg driftkostnad och energiförbrukning.

Tabell 16. Schematisk jämförelse mellan de tre diskuterade slamhanteringsalternativen.

Table 16. Schematic comparison between three different ways of using sewage sludge.

	Direkt slamspridning på åkermark – Referensfall	Slambränsleblandning- Förbränning och fosforutvinning	Slam för sluttäckning av deponi
Användning idag (av allt slam) ¹	25 %	0 %	20 %
Potential idag (av allt slam)	84 % ²	100 %	100 %
Potentiell användning i framtiden	högre än idag	högre än idag	lägre än idag
Miljö: kretslopp fosfor	ja	ja	nej
Miljö: kretslopp kväve	ja	ja	nej
Miljöpåverkan Giftfri miljö	referensfall	<referensfall	<referensfall
Klimatpåverkan	djupare analys behövs ³	djupare analys behövs ³	djupare analys behövs ³
Produktkvalitet gödningsmedel	låg	hög	nej
Investeringskostnad	nej (ja för hygienisering)	ja	nej
Driftkostnad ⁴	referensfall	>referensfall	>referensfall
Energiförbrukning ⁴	referensfall	>referensfall	≈referensfall

¹ Av resterande slammet används 32 % till anläggningsjord, 9 % finns som lager, 4 % läggs på deponi, 1 % förbränns (Fig 1)

² Andel av slammet som idag uppfyller gällande lagstiftning för att få spridas på åkermark

³ Klimatpåverkan behöver utredas noggrannare. I fallet med slambränsleblandningar åtgår mer resurser, men samtidigt erhålls ett mer effektivt fosforgödningsmedel, samt användbara biprodukter

⁴ Vid ett kommande krav på hygienisering av avloppsslam kommer skillnaderna emellan systemen slamspridning på åkermark och samförbränning av slam med fosforutvinning att minska både vad gäller energi och kostnader

6 Slutsatser

Arbetet med att demonstrera beredning av slambränsleblandningar, förbränning av bränsleblandningarna och utvinning av fosfor ur aska från förbränningen har lett fram till följande slutsatser:

6.1 Bränsleblandning

- En erfarenhet från beredning av slambränsleblandningar är att nedbrytning av bränslet genom komposteringsprocess startar snabbt, vilket ger upphov till hanteringsproblem p.g.a. bildning av gas och värmeutveckling och minskar värmevärdet.

6.2 Förbränning

- Det går att elda slambränsleblandningar med en inblandning av upp till 45 % slam (% avser fuktigt bränsle) på en befintlig rosterpanna, vid 50 % last under en dag.
- För att elda slambränsleblandningar med hög andel slam under en längre period och vid högre last behövs modifieringar av askutmatningssystem och rökgasrening för att öka kapaciteten i dessa system.
- Resultaten indikerar en minskad benägenhet till slagning av bränslebädd vid samförbränning med slam. Flygaskorna visade också på en tendens till att innehålla lägre halter av korrosiva alkaliklorider vid samförbränning med slam.

6.3 Fosforåtervinning

- En hög fosforhalt i askan är fördelaktigt ur fosforutvinningssynpunkt och för processekonomin.
- Det är i första hand bottenaska som lämpar sig för fosforutvinning med EasyMining Sweden's metod. Skall flygaska användas för fosforutvinning krävs en ytterligare optimering av upplösningsförhållandena (vilket inte ingick i detta projekt).
- Renheten hos ammoniumfosfaten (gödselmedlet) är mycket hög.

7 Rekommendationer och användning

Det är sedan tidigare känt att inblandning av slam till bränslet har en positiv effekt förbränningsmässigt. I praktiken är det dock en mycket liten del av slammet som går till förbränning. Att elda slam utan efterföljande fosforutvinning står också i strid med behovet av återföring av fosfor i slammet. Detta arbete har gett nya erfarenheter av inblandning av slam till bränslet vid förbränning och bearbetning av askan för att ta tillvara fosfor. Det visas att det är möjligt att utvinna fosfor ur aska från förbränning av bränsleblandningar som innehåller slam. Förbränningen kan ske i befintlig infrastruktur för kraft- och värmeproduktion, dock ska man räkna med att det behövs mindre ombyggnationer av t.ex. askutmatning och rökgasrening. Slammets innehåll av energi tas tillvara i förbränningsprocessen och det ersätter annat bränsle, som skulle eldats annars. Vidare kan man räkna med att emissionsgränsvärdena är oförändrade vid förbränning av slambränsleblandningar i förbränningsanläggningar i befintlig infrastruktur, att rökgasreningen därför behöver förbättras för att klara dessa gränsvärden och att emissionerna från förbränningsanläggningarna därmed inte ökar.

7.1 Slambränsleblandningar

Det rekommenderas att beredning av slambränsleblandningar görs i närtid innan de skall förbrännas, för att inte komposteringsprocessen skall ta fart och bryta ned bränslet och ställa till praktiska problem p.g.a. gasbildning och värmeutveckling. Beredning av blandningar av slam och ”blandningsbränsle” (i detta arbete RT-flis) är arbetskrävande och lämpar sig därför mindre bra för större volymer av bränsle. Färdiga slambränsleblandningar rekommenderas därför i första hand för mindre förbränningsanläggningar, som är intresserade av en inblandning av slam till bränslet. I större anläggningar kan man istället installera kringutrustning för att pumpa slammet direkt till pannan vid förbränningen.

7.2 Förbränning

För förbränningsanläggningar som är intresserade av förbränning med inblandning av slam rekommenderas att bestämma vilka inblandningsgrader av slam som är intressanta genom att räkna fram bränsledata för blandningar av slammet och ”blandningsbränslet”. Från bränsledata kan man sedan uppskatta flöde för bottenaska, stoftbelastning samt halterna av NO_x , SO_2 och HCl ut från pannan och på så vis bedöma lämpliga inblandningsgrader.

Utgående från bränsledata för blandningar av slam och ”blandningsbränsle” rekommenderas bestämning av lämplig inblandningsgrad för proveldning med syfte att undersöka möjligheter och begränsningar för att blanda in slam till förbränningen.

7.3 Fosforutvinning

En så hög fosforhalt som möjligt i askan är fördelaktigt ur fosforutvinningsynpunkt och för processekonomin. Det kan åstadkommas antingen genom inblandning av ett bränsle med en lägre askhalt än RT-flis, inblandning av ett bränsle med högre fosforinnehåll än RT-flis, eller genom att öka andelen avloppsslam i bränsleblandningen. För en högre inblandningsgrad krävs dock en högre torrhalt på slammet för att det ska fungera förbränningsmässigt.

7.4 Fortsatt arbete

Vi har identifierat följande områden som viktiga för fortsatt arbete:

- För en ökad inblandning av slam till samförbränning behövs fortsatt arbete kring energieffektiva metoder att reducera fukthalten i avloppsslam.
- Det vore intressant att studera hur man processmässigt kan påverka förbränningen så att en större andel av fosfor i askan blir av mer löslig typ. Det vore också intressant om en större andel av fosfor kunde styras till att hamna i en askfraktion, t.ex. bottenaskan.
- För att bättre förstå slambränsleblandningar, förbränning och utvinning av fosfor, med nyttjande av befintlig infrastruktur, ur ett helhetsperspektiv rekommenderas vidare systemanalys som tar hänsyn till teknik, miljö, ekonomi mm.

8 Litteraturreferenser

- [1] Hållbar återföring av fosfor – Naturvårdsverkets redovisning av ett uppdrag från regeringen. Naturvårdsverket Rapport 6580, september 2013
- [2] SCB Kväve- och fosforbalanser för jordbruksmark och jordbrukssektor 2011 Statistiska meddelande M1 40 SM 1301, s 25, 21 november 2013
- [3] Utsläpp till vatten och slamproduktion 2010 Kommunala reningsverk, skogsindustri samt övrig industri. Sveriges officiella statistik. Statistiska meddelanden MI 22 SM 1201, Naturvårdsverket och Statistiska Centralbyrån
- [4] Gyllenhammar M., Herstad Svärd S., Davidsson K., Åmand L-E., Steenari B-M. Folkesson N., Pettersson J., Svensson J-E., Boss A., Johansson (idag Bäfver) L., Kassman H. Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 2, Värmeforskrapport 1037, Anläggnings- och Förbränningsteknik, december 2007
- [5] Herstad Svärd S., Åmand L-E., Bowalli J., Öhlin J., Steenari B-M., Pettersson J., Svensson J-E., Karlsson S., Larsson E., Johansson L-G., Davidsson K., Bäfver L., Almark M. Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 3, Värmeforskrapport 1167, Anläggnings- och Förbränningsteknik, januari 2011
- [6] Eskilsson D., Johansson A., Johansson (idag Bäfver) L., Wikström-Blomqvist E. Samförbränning av bilfluff, rötslam och avfall i en 20 MW fluidbäddpanna – Studier av bränslesammansättningens påverkan på beläggingsbildning, Projektnummer: 22432-1, SP-AR 2007:11
- [7] Grimm A., Skoglund N., Eriksson G., Boström D., Boman C., Öhman M., Effekter av fosfortillsats vid förbränning av biomassa, Värmeforskrapport 1157, Anläggnings- och Förbränningsteknik, november 2010
- [8] Pettersson, A., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M. "Leaching of ashes from co-combustion of sewage sludge and wood. Part I: Recovery of phosphorus" *Biomass and Bioenergy* 2008:32(3);224-235
- [9] Gyllenhammar M., Herstad Svärd S., Davidsson K., Hermansson S., Liske J., Larsson E., Jonsson T., Zhao D. Additiv för att minska driftproblem vid rosterförbränning av avfall, Waste Refinery rapport, projektnummer WR 47, 2013
- [10] <http://www.susan.bam.de/index.htm>, 25 november 2013
- [11] Herman, L. (2009). P-recovery from sewage sludge ash – technology transfer from prototype to industrial manufacturing facilities. Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, May 10-13, 2009, Vancouver, Canada. IWA Publishing, pp. 405-416
- [12] Stark K. (2005) Phosphorus release and recovery from treated sludge. Doctor thesis, Dep. Land and Water Resources Engineering, KTH, ISBN 91-7178-123-4.
- [13] System för återanvändning av fosfor ur avlopp, Naturvårdsverket Rapport 5221, Balmér, P., Book, K., Hultman, B., Jönsson, H., Kärrman, E., Levlin, E., Palm, O., Schönning, C., Seger, A., Stark, K., Söderberg, H., Tideström, H., Åberg, H. Naturvårdsverket, 2002
- [14] <http://www.ostara.com/technology> 25 november 2013
- [15] <http://www.dhv.com/Markets/Water/Water-Treatment/Water-treatment---Wastewater/Crystalactor> 25 november 2013

- [16] <http://www.cirkulation.com/2013/03/fosforatervinning-pa-forsok-i-halmstad/> (15 november 2013)
- [17] Tideström H., Alvin L., Jennische U. och Hultman B. (2009) Fosforutvinning ur avloppsslam: Teknik, miljö-, hälso- och klimateffekter. Sweco rapport, uppdragsnummer 1150 744 000
- [18] www.easymining.se (29 oktober, 2012)
- [19] ICDD, The Powder Diffraction File, PDF-2. International Center for Diffraction Data: Newtown Square, PA, 2004
- [20] Inorganic Crystal Structure Database online (ICSD Web). National Institute of Standards and Technology, Fachinformationzentrum Karlsruhe: Karlsruhe, Germany. <http://icsd.fiz-karlsruhe.de/>
- [21] KEMI Rapport 1/11 Kadmiumhalten måste minska – för folkhälsans skull, En riskbedömning av kadmium med mineralgödsel i fokus, Rapport från ett regeringsuppdrag, En rapport från Kemikalieinspektionen, s. 6, februari 2011
- [22] KEMI Rapport 1/11 Kadmiumhalten måste minska – för folkhälsans skull, En riskbedömning av kadmium med mineralgödsel i fokus, Rapport från ett regeringsuppdrag, En rapport från Kemikalieinspektionen, s. 40, februari 2011
- [23] Nziguheba, G & Smolders, E. 2008. Input of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European Countries. Science of the Total Environment 390, 53-57
- [24] REVAQ Årsrapport 2012, s. 9, Svenskt Vatten, oktober 2013

A Fosforns väg i pannan

Fosforns väg i pannan uppskattas på två sätt. Först utgås ifrån erhållna mängder bottenaska vid försöken. Den andra uppskattningen utgår istället ifrån bränsleanalys och pannans drift. De två olika uppskattningarna jämförs m.a.p. ingående fosforflöde till pannan (inringat nedan) och de ger ungefär samma ingående fosforflöde.

A.1 Utgångspunkt bottenaska

	35/65 mix	45/55 mix*
UT kg bottenaska/provperiod:	10320	10740
<i>*Utvägd aska från provperioden uppskattas till 80 % av bildad mängd, resten fick ej plats i containern.</i>		
Antag 80 % aska ut som bottenaska & 20 % som flygaska =>		
	35/65 mix	45/55 mix
=> IN kg aska/provperiod = UT kg bottenaska/provperiod /0,8)=	12900	13425
UT kg flygaska/provperiod =	2580	2685
[= IN kg flygaska/provperiod - UT kg bottenaska/provperiod]		
	35/65 mix	45/55 mix
botten P, mg/kg ts	25 150	38 560
flyg P, mg/kg ts	22915	27440
UT-botten, mg P/provperiod = UT kg bottenaska/provperiod x bottenP, mg/kg ts =	259548000	414134400
UT-flyg, mg P/provperiod = UT kg flygaska/provperiod x flyg P, mg/kg ts=	59120700	73676400
=> UT-botten, kg P/provperiod	260	414
=> UT-flyg, kg P/provperiod	59	74
=> IN P i aska kg/provperiod = UT-botten kg P/provperiod + UT flyg kg P/provperiod =	319	488
=> UT-botten (%)	81%	85%

A.2 Utgångspunkt bränsleanalys

	35/65 mix	45/55 mix*
Avgiven fjärrvärme-effekt MW (inkl rökgaskondensering)	25	25
Avgiven el-effekt MW	8	8
Antag η (tot) på systemet	0,85	0,85
=> Tillförd bränsle-effekt MW = (FV-effekt + El-effekt)/ η (tot)	39	39
Värmevärde (MJ/kg ts)	15,9	15,2
=> IN bränsle, kg TS/s= Tillförd bränsle-effekt/Värmevärd =	2,44	2,55
Ask-halt i bränslet (%):	10,4	12,5
=> IN aska, kg/s= (Askhalt i bränslet /100) x IN bränsle kg TS/s=	0,25	0,32
=> IN aska, kg/h =	914	1149
=> IN aska, kg/ 10h	9142	
=> IN aska, kg/ 8 h (uppskattat att 80% av askan rymdes i containern)		9195
vikt-% P i ts bränsle	0,43	0,60
vikt-% P i ts bränsle-aska	4,13	4,80
=> IN P i aska, kg/ provperiod = IN P i aska/provperiod	378	441

B Detaljerade resultat för fosforutvinning

Tabell B1. Uppnådd upplösningsgrad, vikt-% avseende respektive komponent.

	P	Fe	Al	Ca	Cu	K	Mg	Mn	Na	S
Bottenaska										
35/65 mix 1	*	41	48	95	74	51	73	66	57	62
35/65 mix 2	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
35/65 mix 3	88	34	47	88	91	55	69	64	56	75
35/65 mix 4	89	37	41	93	*	60	74	73	57	*
45/55 mix 1	90	22	63	76	76	83	83	84	81	20
45/55 mix 2	73	19	53	69	58	76	72	75	71	19
45/55 mix 3	86	20	56	73	64	80	77	80	78	19
Flygaska										
35/65 mix 1	77	19	55	65	55	70	69	72	65	18
35/65 mix 2	86	35	32	88	70	41	71	65	42	58
35/65 mix 3	88	38	39	92	54	48	69	67	49	70
35/65 mix 4	91	41	35	92	47	45	75	55	48	63
45/55 mix 1	79	21	56	69	66	78	75	77	74	19
45/55 mix 2	74	19	57	71	63	79	78	82	75	17
45/55 mix 3	53	13	42	50	40	51	54	56	49	14

* innebär att värdena från analysen varit avvikande/orimliga och därför strukits

** ej beräkningsbara då resultatet från askornas totalinnehåll varit orimliga, se not i föregående tabell

Tabell B2. De extraherbara mängderna för respektive ämne, vikt-% m.a.p. askan.

	P	Fe	Al	Ca	Cu	K	Mg	Mn	Na	S
Bottenaska										
35/65 mix 1	*	1,16	1,02	5,59	0,04	0,38	0,63	0,05	0,20	0,18
35/65 mix 2	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
35/65 mix 3	2,27	0,92	0,83	5,08	0,04	0,25	0,53	0,04	0,18	0,16
35/65 mix 4	2,61	1,05	0,77	5,41	*	0,25	0,63	0,04	0,17	*
45/55 mix 1	3,38	1,28	0,77	6,43	0,05	0,24	0,64	0,04	0,16	0,12
45/55 mix 2	3,39	1,42	0,96	6,74	0,04	0,28	0,66	0,05	0,19	0,14
45/55 mix 3	3,47	1,44	0,66	6,29	0,04	0,21	0,64	0,04	0,16	0,11
Flygaska										
35/65 mix 1	1,67	0,73	1,92	7,45	0,03	3,08	1,20	0,20	0,71	0,41
35/65 mix 2	1,63	0,65	1,68	6,52	0,03	2,57	1,03	0,17	0,63	0,36
35/65 mix 3	2,03	0,72	1,75	6,74	0,04	2,79	1,06	0,18	0,72	0,38
35/65 mix 4	2,03	0,70	1,59	6,00	0,03	2,43	0,95	0,16	0,65	0,36
45/55 mix 1	2,04	0,78	1,87	6,66	0,04	2,74	1,07	0,18	0,67	0,40
45/55 mix 2	2,03	0,74	1,90	6,81	0,04	2,91	1,09	0,19	0,69	0,40
45/55 mix 3	1,46	0,50	1,26	4,39	0,03	1,79	0,70	0,12	0,45	0,27

* innebär att värdena från analysen varit avvikande/orimliga och därför strukits

** ej beräkningsbara då resultatet från askornas totalinnehåll varit orimliga, se not i föregående tabeller



WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
wasterefinery@sp.se
www.wasterefinery.se