

Samförbränning av avloppsslam med kol och trä i en panna med fluidiserad bädd

– anrikning av fosfor och tungmetaller i askor

*Lars-Erik Åmand
Bo Leckner
Leif Hansson
Olof Norrlöw*



VA-Forsk

VA-Forsk är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är frivillig. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-Forsk initierades gemensamt av Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvattenrening
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

VA-Forsk styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Ola Burström, ordförande

Olof Bergstedt

Roger Bergström

Stefan Marklund

Mikael Medelberg

Peter Stahre

Jan Söderström

Göran Tägtström

Agneta Åkerberg

Skellefteå

Göteborgs VA-verk

Svenskt Vatten AB

Luleå

Roslagsvatten AB

VA-verket Malmö

Sv kommunförbundet

Borlänge

Falkenberg

Steinar Nybruken, adjungerad

Thomas Hellström, sekreterare

NORVAR, Norge

Svenskt Vatten AB

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

VA-Forsk
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
E-post svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Samförbränning av avloppsslam med kol och trä i en panna med fluidiserad bädd

– anrikning av fosfor och tungmetaller i askor

Lars-Erik Åmand

Bo Leckner

Leif Hansson

Olof Norrlöw

Rapportens titel:	Samförbränning av avloppsslam med kol och trä i en panna med fluidiserad bädd – anrikning av fosfor och tungmetaller i askor
Title of the report:	Co-combustion of sewage sludge with coal and wood in a fluidized bed combustor – enrichment of phosphorus and heavy metals in ashes
Rapportens beteckning	
Nr i VA-Forsk-serien:	2003-50
ISSN-nummer:	1102-5638
ISBN-nummer:	91-85159-16-6
Författare:	Lars-Erik Åmand, Bo Leckner, Institutionen för Energiteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Leif Hansson, Olof Norrlöw, Kemira Kemi AB
VA-Forsk projekt nr:	21-111
Projektets namn:	Sameldning av mekaniskt avvattnat slam med biobränsle i fluidiserad bädd – fullskaleförsök
Projektets finansiering:	VA-Forsk, Statens Energimyndighet, Kemira Kemi AB
Rapportens omfattning	
Sidantal:	39
Format:	A4
Sökord:	Förbränning av kommunalt avloppsslam, fosfor i askor, spårelement i askor
Keywords:	Combustion of municipal sewage sludge, phosphorus in ashes, trace elements in ashes
Sammandrag:	Kommunalt avloppsslam från två olika avloppsreningsverk i Sverige har bränts tillsammans med träpellets eller kol i en cirkulerande fluidiserad bäddpanna (CFB). Resultatet visar att avloppsslam och flygaska efter förbränning innehåller lika mycket fosfor som andra fosforkällor inom jordbruket. Halten spårämnen i förhållande till fosfor (Hg, Cd, Pb, Cr, Cu) är dock högre än in natur- och handelsgödsel.
Abstract:	Municipal sludge, originating from two wastewater treatment plants in Sweden, has been burned together with wood pellets or bituminous coal in a circulating fluidised bed (CFB). The results show that sewage sludge and fly ash, after combustion of sludge, contain similar amounts of phosphorous as other phosphorous sources for agricultural use, but the levels of trace elements in relation to phosphorous (Hg, Cd, Pb, Cr, Cu) are higher than in animal manure and artificial fertilizer.
Målgrupper:	Naturvårdsverket, LRF, Svenskt Vatten, universitet och högskolor, Renhållningsverksföreningen, Statens Energimyndighet
Omslagsbild:	Cementpump ombyggd för att hantera mekaniskt avvattnat slam samt till vänster i bild Lars-Erik Åmand. Foto: Erik Winnfors
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2003
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

FÖRORD

Naturvårdsverket har på regeringens uppdrag tagit fram en aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp (Rapport 5214, december 2002). Parallellt med Naturvårdsverkets arbete för en ny aktionsplan för fosforanvändning har som ett oberoende projekt arbetet bakom denna rapport bedrivits.

Denna rapport bygger på förbränningsförsök med samförbränning av slam med trädbränsle och kol genomförda vid vår 12MW cirkulerande fluidiserade bäddpanna på Chalmers kraftcentral. Redovisningen har inspirerats av en rapport utgiven av Naturvårdsverket med titeln: *"Halter av 61 spårelement i avloppsslam, stallgödsel, handelsgödsel, nederbörd samt i jord och gröda"*, (Rapport 5148, Jan Eriksson, Institutionen för markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet). Det arbete som ligger bakom rapport 5148 har finansierats av Svenska Vatten & Avloppsverksföreningen, Naturvårdsverket och Lantbrukarnas Riksförbund.

Huvudfinansiär för forskningsverksamheten vid Chalmers kraftcentral är Statens Energiverk inom ramen för programmet *"Förbränning och Förgasning av Fasta Bränslen"*. Det extra forskningsstödet från VA-Forsk samt samarbetet mellan Institutionen för Energiteknik Chalmers Tekniska Högskola och Kemira Kemi i Helsingborg har möjliggjort den specialinriktning mot fosforanalyser och kontaminerat av tungmetaller i askorna från förbränning som visas i denna rapport.

Samförbränning av kommunalt avloppsslam med framförallt biobränsle kan utgöra ett alternativ för återföring av näringsämnen till jordbruksmark. Detta förutsätter dock att fosfor utvinns ur flygaskan, alternativt att vissa tungmetaller (kvicksilver och kadmium) avlägsnats innan askan återanvänds. Slutsatser och resultat i denna rapport bygger på realistiska försök i full skala och utgör således en solid grund för fortsatt arbete. Målet är att visa att samförbränning av slam är ett realistiskt alternativ tekniskt sett där alla organiska gifter kan destrueras samtidigt som energiåtervinning kan hjälpa till att hålla kostnaderna för slamdestruktionen nere. Ambitionen är att denna strategi skall gå att förena med de målsättningar som satts upp i *"Aktionsplan för återföring av fosfor"*.

Göteborg i november 2003
För Chalmers tekniska högskola
Lars-Erik Åmand
Projektledare

INNEHÅLLSLISTA

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
Introduktion	9
Experimentell bakgrund	10
Pannan	10
Bränslena	10
Genomförande	11
Resultat	11
Relativ ökning av askkomponenter	11
Askbalans och fördelning av askan	12
Koncentrationen av fosfor	13
Spårelement – absoluta koncentrationer	14
Jämförelse av spårelementkoncentrationer i relation till P-innehållet	15
Ackumulation av spårelement i jordbruksmark för matproduktion	16
Slutsatser	17
Särskilt tack	17
Referenser	18
Tabeller	19
Figurer	21
Bilaga 1	32
Bilaga 2	38

SAMMANFATTNING

Kommunalt slam från två olika avloppsreningsverk i Sverige har bränts tillsammans med träpellets eller kol i en cirkulerande fluidiserad bädd (CFB) panna utrustad med en sekundär cyklon och ett textilt spärrfilter för uppfångningen av flygaskan. En sådan samförbränning är ett alternativ till monoförbränning av slam. Slammet brändes antingen som mekaniskt avvattat eller förtorkat. Mekaniskt avvattat slam matades in i eldstaden via en speciell pump medan förtorkat slam kunde använda ordinarie bränslehanteringssystem som normalt används för kol, träflis och träpellets. Bägge typerna av slam brändes med antingen träpellets eller kol som huvudbränsle. Driftförhållandena var identiska och typiska för en CFB-panna. Fokuseringen i detta projekt var på askbalanser och på analys av bränslen och askor för att erhålla koncentrationsnivåer på relevanta ämnen. Innehållet av fosfor (P) är speciellt intressant i relation till spårämnen som kvicksilver (Hg), kadmium (Cd), bly (Pb), krom (Cr) koppar (Cu), nickel (Ni) och zink (Zn). En jämförelse har därför gjorts mellan dessa spårämnen och fosfor i olika askor, i slam men också i andra fosforinnehållande källor som kan tänkas användas för jordbruksändamål. Resultaten visar att avloppsslam och flygaska efter förbränning av slam innehåller lika höga nivåer fosfor som andra fosforkällor som används inom jordbruket. Dock är nivån av tungmetaller i förhållande till fosfor (Hg, Cd, Pb, Cr, Cu) högre än i stallgödsel och konstgödsel och högre än gällande gränsvärden i Sverige.

SUMMARY

Municipal sludge, originating from two wastewater treatment plants in Sweden, has been burned together with wood pellets or bituminous coal in a circulating fluidised bed (CFB) boiler equipped with a secondary cyclone and bag filter for fly ash removal. Such co-combustion is an alternative to mono-combustion of sludge. The sludge is burned in either mechanically dewatered or pre-dried form. The mechanically dewatered sludge was fed with a pump, but pre-dried sludge could be fed by the fuel feed system normally used for coal. Both types of sludge were burned with either wood-pellets or coal as main fuel under identical operating conditions, typical for a CFB boiler. The focus was on ash balances and on analysis of fuels and ashes to obtain concentrations of relevant species. The presence of phosphorous (P) is of special interest in relation to trace elements, such as mercury (Hg), cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu), nickel (Ni) and zinc (Zn). For this reason a comparison has been made between these trace elements and phosphorous in the various ashes and the original sludge as well as other sources of phosphorous that could be used for agricultural purposes. The results show that sewage sludge and fly ash, after combustion of sludge, contain similar amounts of phosphorous as other phosphorous sources for agricultural use, but the levels of trace elements in relation to phosphorous (Hg, Cd, Pb, Cr, Cu) are higher than in animal manure and artificial fertilizer and higher than the present limits in Sweden

INTRODUKTION

Slam från kommunala avloppsreningsverk kan förbrännas i speciella anläggningar. Exempel på en sådan är en anläggning med förbränning i fluidiserad bädd i Hamburg [1]. I en specialiserad anläggning som denna förstörs organiska gifter vid själva förbränningen. Oorganiska spårämnen som klor och svavel fångas upp i rökgasreningen. En låg förbränningstemperatur och stegning av lufttillförseln leder till låga emissioner av kväveoxider (NO_x) trots höga nivåer av kväve i slammet. Nackdelen med detta koncept är att om inte ett stödbränsle används, blir torkning av slammet före destruktion nödvändigt för att upprätthålla en förbränning vid en tillräckligt hög temperatur som vid avfallsförbränning är 850. Torkbehovet av slam i kombination med rökgasreningsprocessen gör anläggningen ganska komplex och kan bara motiveras i anslutning till stora avloppsreningsverk. Samförbränning av slam med kol eller andra primärbränslen som träpellets erbjuder ett alternativ till samförbränning. Idén är att bränna slammet i konventionella fastbränslepannor typ fluidiserade bäddpannor, vilka normalt används för generering av kraft och/eller värme. Detta ökar antalet anläggningar där slam kan förbrännas och minskar därmed transportbehovet från små avloppsreningsverk. Energiinnehållet i slam kan återvinnas antingen i anslutning till torkningen före förbränningen eller (om låg temperaturvärme efterfrågas i ett fjärrvärmenät) genom att fukten kondenseras i en rökaskondensor. Om kol används som basbränsle leder samförbränning med slam till en effektiv reduktion av CO₂. Inom EU är regelverket för förbränning av enbart slam i anläggningar för monoförbränning detsamma som för förbränning av osorterat hushållsavfall. Detta regelverk har anpassats för att också gälla samförbränning av avfall, typ slam i konventionella förbränningsanläggningar [2]. Detta gör det lättare att få acceptans för även samförbränningsalternativet och att få igenom miljöprövningen. Alternativet till förbränning av avloppsslam är att använda slam direkt som gödsel i jordbruket. Speciellt fosfor betraktas som en begränsad resurs. Därför kan krav på återvinning av fosfor till jordbrukssektorn förväntas i framtiden. Det som begränsar denna möjlighet är en förorening av slammet med avseende på olika ämnen som härrör från mänskliga aktiviteter. Speciell uppmärksamhet bör riktas mot spårämnen som kvicksilver (Hg), kadmium (Cd), bly (Pb), krom (Cr), koppar (Cu), nickel (Ni) och zink (Zn) vilka kan kontaminera åkermarken på lång sikt (årtionden). Vid förbränning av avloppsslammet kan denna kontaminering undvikas om spårämnena kan separeras från fosfor i askorna. Huruvida en sådan separation är nödvändig är ämnet för denna publikation. Fokuseringen är på var fosfor och de olika farliga spårämnena återfinns vid samförbränning av avloppsslam från två olika avloppsreningsverk i Sverige med träpellets och kol som basbränslen i en fluidiserad bäddpanna utrustad med en sekundäracyklon och textilt spärrfilter för uppfångning av flygaska. En jämförelse görs också med andra fosforkällor med avseende på kontaminering av de utvalda spårelementen.

EXPERIMENTELL BAKGRUND

Pannan

12MW_{th} cirkulerande fluidiserade bädd (CFB) pannan, belägen på Chalmers tekniska högskola användes i genomförandet av försöken, Figur 1. Eldstaden (1) har ett kvadratisk tvärsnitt på cirka 2,25 m² och en höjd på 13,6 m. Bränsle matas från bränslesilos (20) till botten av eldstaden genom ett bränsleschakt (2). Bädd material eller kalk för avsvavling matas från (17) och (18). Cirkulerande material separeras i en primärcyklon (9) och transporteras genom cyklonbenet (10), partikellåset (11), och i fallet med enbart kol som bränsle också genom en extern värmeväxlare (12), tillbaka till eldstaden. Primärluft matas in via ett luftskåp (3) som är beläget under bottenplattan. Sekundärluft matas in till eldstaden via ett luftregister (4) vid normal luftstegning eller efter cyklonen (7), avancerad luftstegning, [3][4]. Efter att ha passerat utloppskanalen från cyklonen (8) som fungerar som en efterbrännkammare kyls rökgasen till 150 °C i konvektionsstråket och flygaskan separeras från rökgasen först i en sekundärcyklon (13) och sedan i ett textilt spärrfilter (14). Detta är en tvåstegs partikelseparationsprocess. Normalt används enbart ett textilt spärrfilter eller ett elektrofilter för att fånga upp flygaskan utan en cyklon placerad uppströms i rökgaskanalen. De olika sätten att arrangera uppfångandet av flygaska påverkar möjligheten att fånga upp spårelement [5].

Bränslena

Bituminöst kol eller träpellets användes som basbränslen. Kolet har sitt ursprung från Katowice-området i Polen medan träpelletsen producerades från sågspån av inhemska träd som tall och björk i en fabrik belägen i Ulricehamn av företaget AB svensk Brikettenergi. Tillsattsbränslet var två olika kommunala avloppsslam. I första försöksserien användes förtorkat slam från avloppsreningsverket i Himmerfjärden. Denna anläggning renar avloppsvatten från 245 000 invånare i Södertälje och de sydöstra delarna av Stockholm. I andra försöksserien användes mekaniskt avvattnat slam från ”Ryaverket”, det andra största reningsverket i Sverige. ”Ryaverket” tar hand om avloppsvatten från 580 000 invånare i Göteborg med omgivningarna.

För att kunna mata in vått slam i pannan krävdes en installation av en slampump i anslutning till forskningspannan, (21) i Figur 1. Denna slampump är en utveckling av en kolvump som normalt används för att transportera cement. Bränsleegenskaperna återfinns i Tabell 1. Bägge avloppsreningsverk producerar rötat slam och använder järnsulfat för att avlägsna fosfor från avloppsvattnet.

Genomförande

Driftparametrarna för försöken återges i Tabell 2. De variationer som återges i Tabell 2 är uträknade utifrån varje enskilt försök. Ambitionen var att hålla driftparametrarna så lika som möjligt mellan försöken och enbart ändra mängden slam som kvotades in och typ av slam. Det är möjligt att använda högre inblandningskvoter av förtorkat slam än vad som är fallet med mekaniskt avvattnat slam. Detta faktum återspeglas i testprogrammet. Högre slamflöde leder till att mer kalcium (Ca) följer med slammet in i pannan. Detta gör det svårt att frysa det totala molförhållandet kalcium till svavel (Ca/S) eftersom det exakta innehållet av Ca och S i slammet var okänt vid tiden för experimentet. Som framgår av Tabell 2 var driftförhållandena ganska stabila trots den stora skillnaden mellan de olika bränslena. Forskningspannan är utrustad med ett reglersystem som vidmakthåller luftflödena på en konstant nivå när väl lastnivån är bestämd. Bränsleflödet styrs av syrekoncentrationen i utgående rökgas från eldstaden och tryckvariationerna på vattensidan balanseras med hjälp av den värmeväxlare som styr utlevererad värmemängd. Detta reglersystem gör det möjligt att upprätthålla mycket stabila driftförhållanden för åtskilliga timmar vilket är viktigt när spårämnen och fosfor skall kartläggas. Alla försök genomfördes under en period på mellan 10 och 24 timmar innan fasta prover togs för analys. Denna strategi förbättrar askbalansen eftersom jämvikt i spårämneskoncentrationerna måste nås innan askprover kan tas. I samband med varje enskilt försök togs följande prover: a) basbränsle och slamprov; b) prov som representerar innehållet i eldstaden togs från provtagningshål H2 i botten av eldstaden och i cyklonbenet (10), Figur 1; c) flygaskprov från sekundär cyklonen (13) och (14). Dessa prover skickades för översikts- och elementaranalys samt för analys av askkomponenter och spårämnen till olika ackrediterade laboratorier.

RESULTAT

Relativ ökning av askkomponenter

Skillnaden i flöde av spårämnen när kol eller träpellets ersätts med slam är speciellt viktigt i detta projekt. Att byta kol eller träpellets med slam får tre konsekvenser. Den första är att värmevärdet är olika, det andra att askhalten i slam är högre och det tredje att också koncentrationen av spårämnen i slam är högre som framgår av Tabell 1 (askinnehåll, värmevärde) och Tabell 3 (spårämneskoncentration, fosforhalt). En jämförelse av tillförseln av aska, spårämnen och fosfor mellan referensfallen med enbart kol och träpellets och försöken med slam tillsatts återges i Figur 2.

Jämförelsen begränsas till spårämnena Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn. För dessa element finns det gränsvärden i Sverige under vilka materialet får användas som en fosforkälla i jordbruket vilket framgår av Tabell 3, [6]. Figur 2 visar de uppenbara resultatet att ökningen av spårelement aska och fosfor är mycket högre när träpellets används som referensbränsle än när kol utgör referens. Förtorkat slam ger alltid högre flöden än vått slam och det leder också till mycket högre flöden av spårelement och fosfor in till pannan.

Askbalans och fördelning av askan

Massbalanser illustrerar noggrannheten i mätningarna. Vid jämvikt i driftsförhållandena kan man uttrycka den totala balansen av fast material för en fluidiserad bäddreaktor på följande sätt:

$$\begin{aligned} & \text{Massflöde av ingående bränsleaska, kalk och kiselsand} \\ & = \text{utgående massflöde av bottenaska och flygaska} \end{aligned}$$

I denna beräkning tas hänsyn till omvandlingen av kalk och till förekomsten av oförbränd koks. Avgången av flyktiga beståndsdelar från askan har dock försumrats. Kiselsand matades vid vissa tillfällen in för att regenerera bottenbädden för att kompensera för det låga askflödet när träpellets användes. De totala massbalanserna som visas i Figur 3 a–d verifierar att överensstämmelsen mellan in- och utgående flöden är bra. Bara i fallet med förbränning av enbart träpellets är denna balans bristfällig vilket beror på de väldigt låga askflödena som inte kunde mätas med tillräcklig noggrannhet. Fördelningen av aska mellan bottenaska och flygaska återges i Figur 4 a–d. Flödet av fast material som lämnar anläggningen (uttryckt som den uppmätta mängden i kg/h) visar en typisk situation för en CFB-panna: mängden bottenaska bestäms av mängden bränsleaska, kalktillförseln och fragmenteringsegenskaperna för dessa inerta material. Andelen bottenaska är högst (41 %) i andra testserien när kol utgjorde basbränsle och bottenbäddmaterialet kontinuerligt regenererades vid alla tre försöken för att avlägsna grova askfraktioner som matats in med kolet. Andelen bottenaska var lägst för motsvarande försök med träpellets som basbränsle (6 %), då bäddregenereringen kunde minimeras och kalkflöden kunde hållas låga. I första försöksserien dominerades bottenaskdelen av askan från förtorkat slam och av ett högre kalkflöde, resulterande i en bottenaskfraktion på 27 %. Fördelningen av flygaska mellan sekundär cyklon och textilt spärrfilter i Figur 4 a–d visar att sekundärcyklonen dominerar uppfångandet av flygaska; som medelvärde fångas 87 % av den totala mängden flygaska upp i sekundärcyklonen.

Koncentrationen av fosfor

Medelvärde av P-koncentrationerna för de två slammen som testats återges i Tabell 3: 3,6 respektive 2,9 %. Detta kan jämföras med det medelvärde på 2,7 % som är resultatet av analyser av slamprover från 47 avloppsreningsverk i Sverige [6]. De individuella värdena (3,6 % och 3,0 %) på de slam som är involverade i denna studie (de ingår också den stora studien med prover från 47 anläggningar) återges också i Tabell 1. Det är tydligt att de två slam som ingår i denna studie väl representerar slam som produceras i Sverige med avseende på koncentrationen av fosfor och att koncentrationen är tillräckligt hög för direktanvändning inom jordbruket. Frågan är var fosfor hamnar efter förbränningen. Figur 5 ger en första ledtråd; fosfor återfinns i askan, mer i de två flygaskproverna än i bottenaskorna. Koncentrationen av fosfor i de uttagna askproverna beror på askhalten i basbränslet. Kolaskan späder ut P-halten i proverna en hel del i jämförelse med när träpellets används med sitt låga askinnehåll. Kalk som tillförs för avsvavling har också en utspädande effekt på fosforhalterna i askan. Eftersom kol har högre svavelinnehåll än träpellets tillfördes mer kalk när kol användes som basbränsle än vid fallet med träpellets som basbränsle. Sammantaget innebär det att de högsta P-halterna återfinns i flygaskorna då träpellets användes som basbränsle. Referensfallen med enbart basbränsle i första försöksserien utgör dock undantag från denna generella bild. De två försöken med enbart träpellets och kol, Figur 5 a, b, genomfördes för tätt inpå (10 timmar) försöken då maximal slaminblandning användes. Datapunkterna vid noll andel avfall har därför inte knutits samman med övriga kurvor i diagrammen. Referensfallen i andra försöksserien, Figur 5 c, d är identiska med avseende på driftsförhållandena och de genomfördes så att inflytandet från försöket innan med slamtillförsel kunde undvikas. Dessa resultat är därmed korrekta. P-koncentrationerna i askorna återspeglar därmed de väldigt låga halterna av fosfor i basbränslena, Figur 5 c, d. P-koncentrationerna i flygaskan när slam användes i kombination med träpellets som basbränsle är högre än i det ursprungliga slammet. Detta resultat är rimligt med tanke på att den organiska delen av slammet avlägsnas vid förbränningen.

Utifrån P-koncentrationssynpunkt kan flygaskorna användas direkt som fosforkälla till jordbruket. Två faktorer avgör om detta är en bra idé eller inte. Första faktorn är relaterad till i vilken form fosfor återfinns i askan i förhållanden till i originalslammet. Den andra faktorn involverar kontaminering av askorna med tungmetaller. Fosfor förekommer i originalslammet som järnfosfat (FePO_4), eftersom fällningskemikalien är järnsulfat. Fosfor bundet som FePO_4 fungerar väl när slam sprids direkt på åkermark. När slammet bränns oxideras järnet till järnoxid (Fe_2O_3) och fosfaten kan slå sig ihop med andra ämnen som till exempel kalcium och aluminium. Kalk som tillförs till eldstaden för att fånga upp svavel kan reagera med fosfor och bilda kalciumfosfat. Detta kan undvikas om släckt kalk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tillförs uppströms det textila spärrfiltret för att fånga upp både klor och svavel från rökgasen. Med

denna strategi kommer sekundär cyklonaskan att hållas fri från en extern källa av kalcium. I detta fall utgör sammansättningen av den oorganiska delen av slammet, det som blir aska vid förbränning av slammet viktigt för vad fosfor binds till. Till exempel kan förhållandet mellan aluminium och kalcium avgöra huruvida fosfor binds som aluminiumfosfat respektive kalciumfosfat och detta kan i sin tur påverka upptaget av fosfor när askan i ett senare skede används för gödseländamål. Alternativet med tillförsel av släckt kalk indikeras i Figur 1, (nr. 19). Denna strategi har dock inte används i detta projekt.

Massbalanser och emissioner av varje enskilt spårämne från första försöksserien återfinns i [4] och för andra försöksserien kommer liknande data att publiceras senare. I ingen av försöksserierna kunde emissioner av spårämnen konstateras, inte ens kvicksilver. Detta gäller inom de gränser som är kopplade till de mätmetoder (våtkemi) som användes för bestämning av tungmetallemissioner vilket är två tiopotenser känsligare än de rådande gränsvärdena inom EU. Askbalanserna kunde slutas på ett tillfredsställande sätt för alla försök med det undantag som tidigare nämnts. Detta innebär att askflödena är väl kontrollerade. För de spårämnen som det rapporteras om nedan gick det att sluta ämnesbalanserna på ett godtagbart sett för första försöksserien [4]. Detta indikerar en hög noggrannhet i analyserna av spårämnen i bränslen och askor. För andra försöksserien användes samma ackrediterade laboratorium som för första försöksserien vilket innebär att även andra försöks-serien redovisar resultat som bör vara tillförlitliga

Spårelement – absoluta koncentrationer

Koncentrationen av fosfor är viktigt för användbarheten av P för jordbruksändamål men lika viktigt är koncentrationen av spårämnen vilket återges för samtliga askprover i Bilaga 1. Resultatet av denna sammanställning kan sorteras upp på följande sätt:

Bottenaskan skiljer sig från flygaskan. Den byggs upp av det bäddmaterial som cirkulerar mellan eldstaden, primär cyklonen, cyklonbenet, partikellåset och tillbaka till eldstaden igen. Vid förbränning av enbart träpellets utgörs bäddmaterialet av sand, vilket därmed dominerar i det material som matas ut som bottenaska. Samförbränning av slam borde slå igenom med högre halter av huvudkomponenterna P och Fe och spårämnen Cu och Zn. Kalk måste också tillföras för avsvavlingens skull och detta ökar Ca innehållet i bottenaskan. Dessa generella trender ses i Tabell A1:a och A1:b för Zn Cu och P men inte för Ca. Som tidigare diskuterats kontaminerades de två referensfallen i första försöksserien av förhållandena från tidigare genomförda försök med hög slamdosering. Även andra försöket med träpellets som basbränsle genomfördes inte med tillräcklig tid mellan ett försök med enbart kol och kalkdosering. Detta förklarar den höga koncentrationen av Ca i bottenaskan. I

referensfallet med enbart kol byggs det material som recirkulerar upp av kiselsand, kolaska och kalk. Om istället andra referensfallet med kol används som ett representativt försök är det tydligt från Tabell A1:a och A1:b att tillförseln av slam ökar koncentrationerna av Zn, Cu P och Fe. Dock gör utspädningen av bottenaskan med kiselsand och den relativt sett grova storleken på bottenaskan att askbalansen visar låga flöden av fosfor och låga koncentrationer vid måttliga slamflöden. Konsekvensen av detta är att bottenaska inte är ett lämpligt material som fosforkälla till jordbruket. Den askfraktion som är mest intressant för återanvändning är den från sekundär cyklonen. Denna fraktion är också den som dominerar i mängd om man går på resultatet från askbalansen, Figur 4. Partikelstorleken på sekundär cyklonaskan är ett fint pulver liknande det som gäller för konstgödsel. Ur spårelementsynpunkt är dock inte sekundär cyklonaskan lika fördelaktig, Tabell A1:c och A1:d. Halten Cu, Zn och Fe ökar avsevärt i askan utöver P-halten som är den värdefulla resursen. Tungmetallerna Hg och Cd ackumuleras också i sekundär cyklonaskan. Kvikksilver utgör ett fall för sig själv på grund av ämnets flyktiga karaktär. Ingen Hg återfinns i flygaskan. De högsta koncentrationerna av Hg återfinns i askan från det textila spärrfiltret, Figur 6 och Tabell A1:e och A1:f. För Cd är egenskaperna lite annorlunda. En liten del av Cd:n återfinns i bottenaskan, Figur 7 och Tabell A1:a, A1:b. Koncentration av Cd i askan från det textila spärrfiltret är ungefär densamma som den i askan från sekundär cyklonen. Ett undantag är andra referensfallet med träpellets som basbränsle där en rad spårämnen uppvisar höga halter i askan från det textila spärrfiltret. Ackumulation av Hg i filteraskan, det relativt låga flödet samt kontamineringen med släckt kalk (om detta används för att fånga upp klor och svavel) leder till slutsatsen att aska från det textila spärrfiltret inte heller är lämpligt som fosforkälla i jordbruket.

Jämförelse av spårelementkoncentrationer i relation till P-innehållet

För att uppskatta hur relevant förekomsten av spårämnen är i askorna i förhållande till fosformängden har förhållandet mellan koncentrationen av spårelement och fosforkoncentrationen räknats ut. Resultatet visas i Figurerna 6 och 7 för Hg och Cd. Full redovisning av samtliga utvalda spårämnen (Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn) på detta sätt återges i Bilaga 2 där också en jämförelse presenteras med dels rent originalslam dels med andra P-källor som är tillgängliga i jordbruket såsom stallgödsel och konstgödsel (se Tabell A2:d). Generellt sett är koncentrationen av spårelement i förhållande till fosfor åtskilliga gånger högre än den är i andra P-källor. Det konstgödsel som är valt som jämförelse säljs med en kadmiumgaranti vilket innebär att Cd nivån skall vara under 5 mg Cd/Kg P. Denna garanti innebär att nivån även på andra spårämnen är låg. Skillnaden mellan konstgödsel och slam är

stor. Askproverna (Tabell A2:a–c) är mindre fördelaktiga om man ser till Hg och Cd än andra P-källor, Figurerna 6 och 7. För Hg är anrikningen så hög i filteraskan att man erhåller ett värde på 180 mg Hg/kgP (Figur 6 c). Detta skall jämföras med nivåer på endast 0,4–0,9 i stallgödsel och 0,04 i konstgödsel (Tabell A2:d). För Cd är inte skillnaden så hög; koncentrationen är mer likartad mellan sekundär-cyklonaskan och filteraskan och Cd förekommer även i stallgödsel fast på låga nivåer. Hursomhelst, förhållandet Cd/P är 300 gånger högre i flygaskan från förbränning av vått avloppsslam än vad den är i konstgödsel med kadmiumgaranti.

Ackumulation av spårelement i jordbruksmark för matproduktion

I Sverige finns det ett gränsvärde för den absoluta koncentrationen av en del spårelement om slam skall användas som direktgödsel på åkermark. Detta gränsvärde är satt med hänsyn till att den organiska delen fortfarande är kvar i slammet. Det finns också ett gränsvärde för den maximala spårämneskoncentrationen beräknad som mängden som tillförs med P-källan på en viss åkerareal under ett år. För Hg detta gränsvärde är 1,5 mg Hg/(hektar, år). Dessa gränsvärden är mer relevanta för bedömningen av användbarheten slam eftersom de är satta för att förhindra långtidskontaminering av jordbruksmarken. För att bedöma olika P-källors risker med avseende på kontaminering på lång sikt av åkermark har en beräkning genomförts baserad på att 22 kg P tillförs per hektar och år. Denna mängd är vald för att den anses spegla ett normalbehov på svensk åkermark [6]. Värdena från Tabell A2:b–c har används för att producera medelvärdesdata på slam och askor för varje försöks-serie. Resultaten visas i Figurerna 8 a–g där också gränsvärdena är inlagda. Figur 8 a visar att originalslam eller askor efter förbränning kommer att ge högre nivåer av Hg kontaminering än stallgödsel eller konstgödsel. Anrikningen av Hg i askan från det textila spärrfiltret leder till nivåer över gränsvärdet medan askan från sekundär-cyklonen ger likartade nivåer som direktanvändning av slam. För Cd är förhållandena även mindre fördelaktiga, Figur 8 b. Endast en av askorna uppvisar en acceptabel nivå under gränsvärdet. Faktum är att medelvärdet av slam som produceras i de 48 avloppsreningsverken i Sverige ger för höga kadmiumnivåer om 22 kg P skulle utgöra riktmärket. Användandet av stallgödsel eller konstgödsel med kadmiumgaranti skulle undvika detta. För andra spårämnen på listan (Pb, Cr, Cu, NiZn) är bilden likartad, Figurerna 8 c–g. Det föreligger alltid en större risk för kontaminering av åkermarken om slam eller askorna efter förbränning av slammet används som P-källa än om stallgödsel eller konstgödsel utgör P-källan. Ända undantaget är Zn, Figur 8 g där flytande och fast gödsel från grisar resulterar i nivåer över gränsvärdet och i paritet med slam och flygaskor.

SLUTSATSER

Följande slutsatser kan dras från detta projekt:

- Samförbränning av slam med kol och träpellets är ett viktigt alternativ till monoförbränning av slam.
- Om man ersätter kol och träpellets med slam kommer det alltid att leda till att nettoflödet av mineraler (P, Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn) in till pannan ökar. Den största ökningen i förhållande till vad basbränslet ger erhålls för kombinationen träpellets och förtorkat avloppsslam.
- Den största andel av den mängd inert material som lämnar pannan är flygaska. Av mängden flygaska totalt utgör sekundärrecykleringsaskan 87 % uträknat som ett medelvärde för samtliga försök. Om fosfor skall återvinnas ur askan utgör sekundärrecykleringsaskan den mest lämpliga askfraktionen. Bottenaskan är mindre fördelaktig eftersom den innehåller låga nivåer fosfor. Inte heller askan från det textila spärrfiltret är lämplig för återvinning eftersom den troligtvis kommer att bli utspädd av släckt kalk om denna teknik appliceras för klor- och svavelreduktion.
- Avloppsslam och flygaska efter förbränning av slam innehåller liknande nivåer av fosfor som andra P-källor för jordbruket. Nivån av spårämnen i relation till fosfor (Hg, Cd, Pb, Cr Cu) är mycket högre i avloppsslam än i stallgödsel och konstgödsel.
- Utnyttjandet av avloppsslam eller flygaska efter förbränning med syftet att förse åkermark med fosfor leder i många fall till att för höga flöden av spårämnen tillförs (på årsbasis) än vad som är acceptabelt i förhållande till gällande gränsvärden i Sverige. Användning av avloppsslam eller flygaska efter förbränning som en P-källa kan bara legitimeras efter att spårämnena har avlägsnats
- Ett alternativ till borttagandet av spårämnena är att använda slam eller flygaskan efter förbränning som en källa för produktion av en ren fosforfraktion med samma koncentration av spårämnen som erhålls i konstgödsel med kadmiumgaranti.

Särskilt tack

Detta arbete har genomförts med ekonomiskt stöd från VärmeForsk Service AB, Statens Energimyndighet och VA-Forsk. Det praktiska genomförandet av försöken lyckades tack vare ett stort engagemang från driftpersonalen anställd av Akademiska Hus i Göteborg AB och av personal som tillhör Institutionen för Energiteknik, Chalmers Tekniska Högskola.

REFERENSER

1. Saenger M., Werther J. and Hanssen H., 1999, "Concentrations and Mass Balance of Mercury in a Fluidized Sewage Sludge Incineration Plant", Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, R.B. Reuther, ed., American Society of Mechanical Engineers, New York, FBC99-0041.
2. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December on the incineration of waste, Official Journal of the European Communities, L 332/91 28.12.2000.
3. Werther J., Hartge E.-U., Lücke K., Fehr M., Åmand L.-E., Leckner B., 2001, "New Air-Staging Techniques for Co-Combustion in Fluidized-Bed Combustors", VGB PowerTech 81, No. 11, pp. 55–63.
4. Åmand L.-E., Leckner, B. Lücke K., Werther J., 2001, "Advanced Air Staging Techniques to Improve Fuel Flexibility, Reliability and Emissions in Fluidized Bed Co-Combustion", Report F6-678, VärmeForsk Service AB, Stockholm.
5. Sloss, L. L., Smith, I. M., 2000, Chapter 7 in "Trace element emission", Report CCC/34, IEA Coal Research, London.
6. Eriksson, J., 2001, "Halter av 61 spårelement i avloppsslam, stallgödsel, handelsgödsel, nederbörd samt jord och gröda", Rapport 5148, Naturvårdsverket, Stockholm.

Tabeller

Tabell 1. Bränsleanalys.

	Coal Series 1	Wood Series 1	Sludge Series 1	Coal Series 2	Wood Series 2	Sludge Series 2
Proximate analysis						
Water (wt-%, raw)	9.2±0.8	9.3±0.23	19.0±5.4	9.0±0.2	8.1±0.2	73.0±0.4
Ash (wt-%, dry)	17.3±2.1	0.8±0.2	37.9±1.0	17.5±1.0	0.4±0.1	46.0±1.3
Combustibles (wt-%, dry)	82.8±2.1	99.2±0.2	62.1±1.0	82.5±1.0	99.6±0.1	54.0±1.3
Volatiles (wt-%, daf)	35.0±0.1	81.2±0.4	90.6±0.7	32.7±0.1	81.7±0.3	90.3±3.1
Ultimate analysis (wt-%, daf)						
C	82.5	50.5	53.2	84.9	50.2	52.1
H	5.0	6.0	7.1	5.0	6.1	7.1
O	9.9	43.4	30.6	7.7	43.6	33.2
S	0.86	0.02	1.95	0.73	0.01	1.60
N	1.70	0.14	7.11	1.57	0.12	6.05
Cl	0.07	0.01	0.05	0.08	0.002	0.09
Lower heating value (MJ/kg)						
Hu, daf	32.49	18.91	20.92	33.35	18.80	19.88
Hu, raw	24.03±0.9	17.00±0.05	9.76±0.9	24.65±0.4	17.20±0.03	2.59±0.1
Ash analysis (g/kg dry ash)						
K	3.2±0.15	54±13	4.3±0.43	11±0.22	100±6.2	8.6±0.30
Na	0.80±0.19	11±3.3	1.4±0.13	1.9±0.22	6.2±2.6	1.8±0.26
Al	15±1.7	22±3.7	46±3.7	84±2.0	5.1±2.0	67±0.86
Si	310±25	94±19	125±6.8	290±4.0	72±8.8	200±10
Fe	43±7.2	74±37	180±12	47±1.4	15±3.7	110±11
Ca	29±6.4	160±25	64±5.0	30±1.9	230±12.8	43±2.4
Mg	14±2.2	24±3.9	10±0.85	18±0.28	36±16	10±0.21
P	5.3±4.0	41±17	91±7.6	1.0±0.61	13±1.0	61±8.2
Ti	1.9±0.43	0.38±0.24	1.3±0.16	0.69±0.021	0.52±0.45	1.7±0.30

daf= dry and ash free, raw=as received

Tabell 2. Driftparametrar.

	Coal/Sludge 1 Series 1	Wood/Sludge 1 Series 1	Coal/Sludge 2 Series 2	Wood/Sludge 2 Series 2
<i>load, MW_{th}</i>	5.9±0.2	5.8±0.1	6.0±0.1	5.7±0.2
<i>bed temp., °C (bottom)</i>	841±0.04	841±0.6	843±2	843±1
<i>bed temp., °C (top)</i>	855±0.6	856±3	860±1	852±6
<i>exit temp. of after burning chamber, °C</i>	772±5	793±7	783±10	823±14
<i>total riser pressure drop, kPa</i>	6.8±0.3	6.8±0.4	6.5±0.03	6.2±0.1
<i>Calcium addition molar ratio Ca/S</i>	2.3±0.1	1.9±0.1 (0) (1)	3.0±0.2	3.0±1.2 (0) (1)
<i>Ca/S with Ca in fuel included</i>	3.2±0.4	2.9±0.8	3.9±0.1	5.2±1.4
<i>excess air ratio</i>	1.23±0.01	1.24±0.001	1.22±0.001	1.22±0.01
<i>combustor air ratio</i>	1.05±0.01	1.03±0.003	1.03±0.002	1.05±0.01
<i>superficial flue gas velocity at top of riser U_{top}, m/s</i>	5.2±0.5	4.5±0.3	4.8±0.1	4.5±0.1

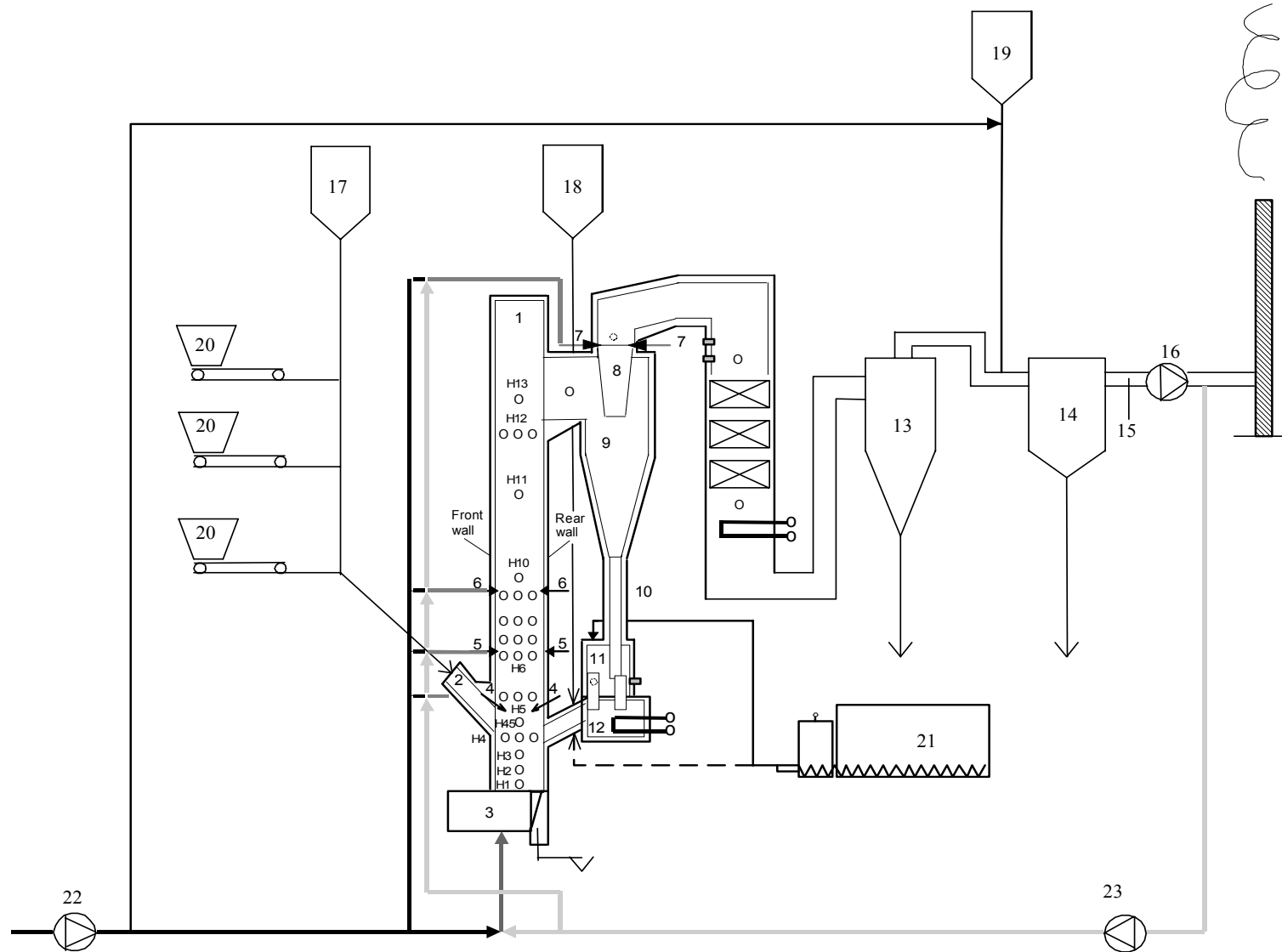
(1) without sludge

Tabeller

Tabell 3. Bränsleanalys. Spårämnen och huvudkomponenter beräknat på torrt bränsle.

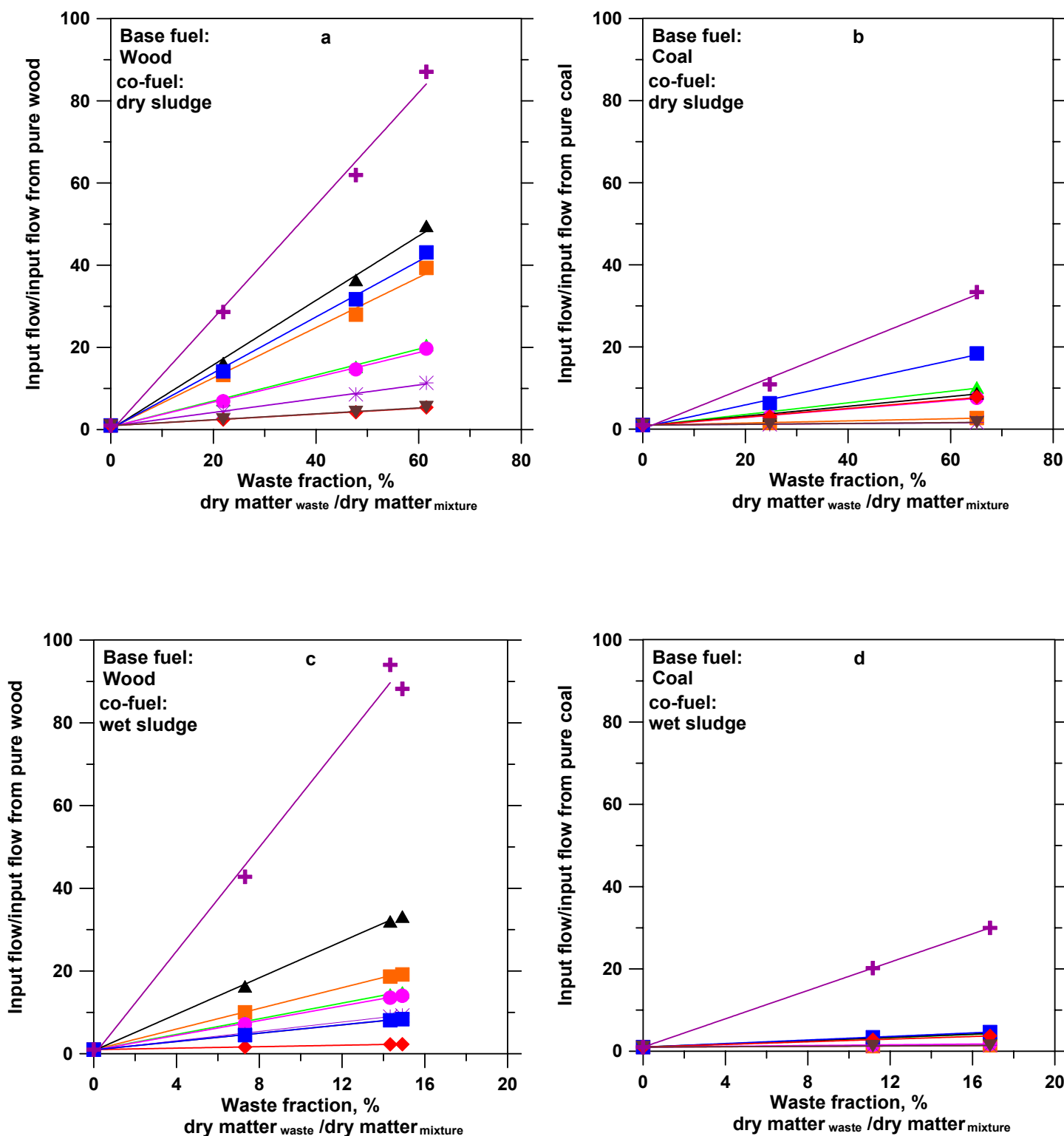
	Coal Series 1	Wood Series 1	Sludge 1 Series 1	Coal Series 2	Wood Series 2	Sludge 2 Series 2	Sludge 1 ref. 4	Sludge 2 ref. 4	Sludge* average	Sludge** average	Limit***
Trace elements (mg/kg dry fuel)											
Hg	0.06±0.02	0.03±0	0.72±0.05	0.06±0.006	0.01±0.01	1.1±0.2	1.13	1.31	1.1	1.2	2.5
Cd	0.11±0.01	0.16±0.03	0.93±0.03	0.1±0	0.17±0	1.5±0.2	1.10	1.57	1.2	1.4	2
Pb	21±3	5±0	30±0.79	21±0	1.0±0	50±2	28	52	33	42	100
Cr	13±3	5±0	110±11	9.2±3	0.46±0.08	43±3	83	44	33	39	100
Cu	35±9	5.8±2	340±18	28±0.7	2.4±0.14	500±60	329	506	390	430	600
Mn	120±18	140±6	220±11	170±10	160±7	450±40	161	405	280	280	n.l.
Co	5.9±1.0	3±0	7.4±0.6	3.3±0.07	0.2±0	9.7±1	5.7	9.3	6.2	8.3	n.l.
Ni	19±2	2±0	26±1.5	1.5±2	0.27±0.04	23±0.8	22	22	20	22	50
As	1.4±0.4	0.3±0	3.8±0.5	1.3±0.2	0.75±0.4	6.2±0.3	2.7	4.8	4.7	5.5	n.l.
Sb	0.40±0.1	0.3±0	1.4±0.3	1±0	1.0±0	4.8±0.4	2.6	3.4	2.4	3.4	n.l.
V	36±5	0.25±0.3	28±3	9.1±0.4	0.45±0.2	29±2	13	22	18	18	n.l.
Tl	0.09±0.01	0.02±0	0.08±0.01	0.05±0	0.03±0	0.13±0.01	0.12	0.26	0.15	0.16	n.l.
Zn	n.a.	n.a.	n.a.	37±2	15.5±0.7	730±40	788	760	550	680	800
Se	n.a.	n.a.	n.a.	1.4±0.6	0.085±0.08	2.0±0.1	1.81	1.39	1.3	1.6	n.l.
Main elements g/kg dry fuel											
K	0.52±0.1	0.45±0.01	1.7±0.2	2.0±0.06	0.4±0.03	4.1±0.18	2.8	6.2	n.r	n.r	n.l
Na	0.13±0.01	0.09±0.02	0.57±0.04	0.34±0.23	0.24±0.01	0.87±0.11	2.0	2.8	n.r	n.r	n.l
Al	2.5±0.6	0.19±0.06	18±1.4	15±0.35	0.02±0.01	32±0.61	24	38	n.r	n.r	n.l
Si	51±10	0.82±0.31	49±4	52±3.2	0.27±0.05	97±6.1	35	65	n.r	n.r	n.l
Fe	7.1±2	0.66±0.41	70±4	8.4±0.65	0.058±0.02	55±4.9	47	87	n.r	n.r	n.l
Ca	4.6±1.0	1.3±0.10	26±2	5.3±0.08	0.91±0.09	21±0.92	30	21	n.r	n.r	n.l
Mg	2.3±0.3	0.2±0.02	4.0±0.3	3.2±0.10	0.14±0.06	4.9±0.10	4.7	4.4	n.r	n.r	n.l
P	0.9±0.8	0.36±0.19	36±3	0.19±0.10	0.05±0.01	29±3.7	36	30	27	33	n.l
Ti	0.3±0	0.003±0.003	0.52±0.06	0.12±0.002	0.002±0.002	0.82±0.14	n.r.	n.r.	1.8	1.8	n.l
* Average of analysis of sludge from 48 different waste water treatment plants in Sweden (ref. 6). ** Weighted average of trace elements in sludge with respect to amount of sludge produced at each waste water treatment plant (average of sludge produced in Sweden, ref. 1). ***Limit for agricultural use of sewage sludge as phosphorous fertilizer in Sweden (ref. 6). n.l.=no limit n.a.=not analysed n.r.=not reported											

Figurer



Figur 1. 12-MW_{te} CFB pannan på Chalmers tekniska högskola; (1) eldstaden; (2) bränsleschakt; (3) luftskåp; (4) sekundärluftregister vid 2,1 m; (5) sekundärluftregister vid 3,7 m; (6) sekundärluftregister vid 5,4 m; (7) sekundärluftregister vid inloppet till utloppskanalen från cyklonen; (8) utloppskanal från cyklonen; (9) varm primärcyclon; (10) cyclonben; (11) partikellås; (12) partikel kylare; (13) kall sekundärcyclon; (14) textilt spärfilter; (15) utsugssond för emissionsmätning; (16) rökgasfläkt; (17) sand behållare; (18) kalkbehållare; (19) behållare för släckt kalk; (20) bränslebehållare; (21) Slampump (22) luftfläkt; (23) rökgasrecirkulationsfläkt.

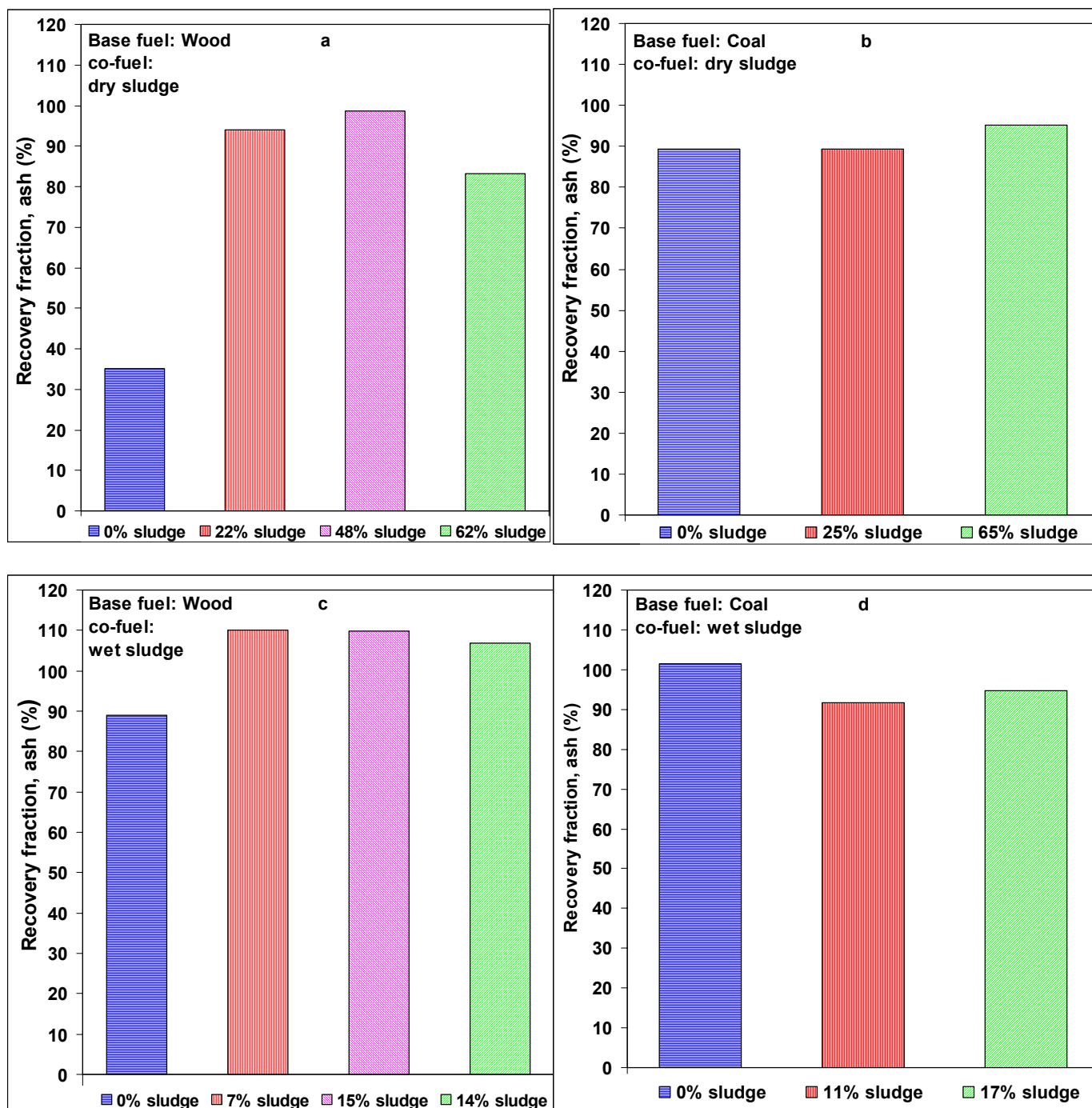
Figurer



Figur 2 a–d. Relativ ökning av ingående flöden till pannan av askkomponenter som funktion av slamtillförseln. Första försöksserien med förtorkat slam som tillsattsbränsle, Figur a, b. Andra försöksserien med mekaniskt avvattnat slam som tillsattsbränsle, Figur c, d. Träpellets som basbränsle i Figur a, c. Kol som basbränsle i Figur b, d.

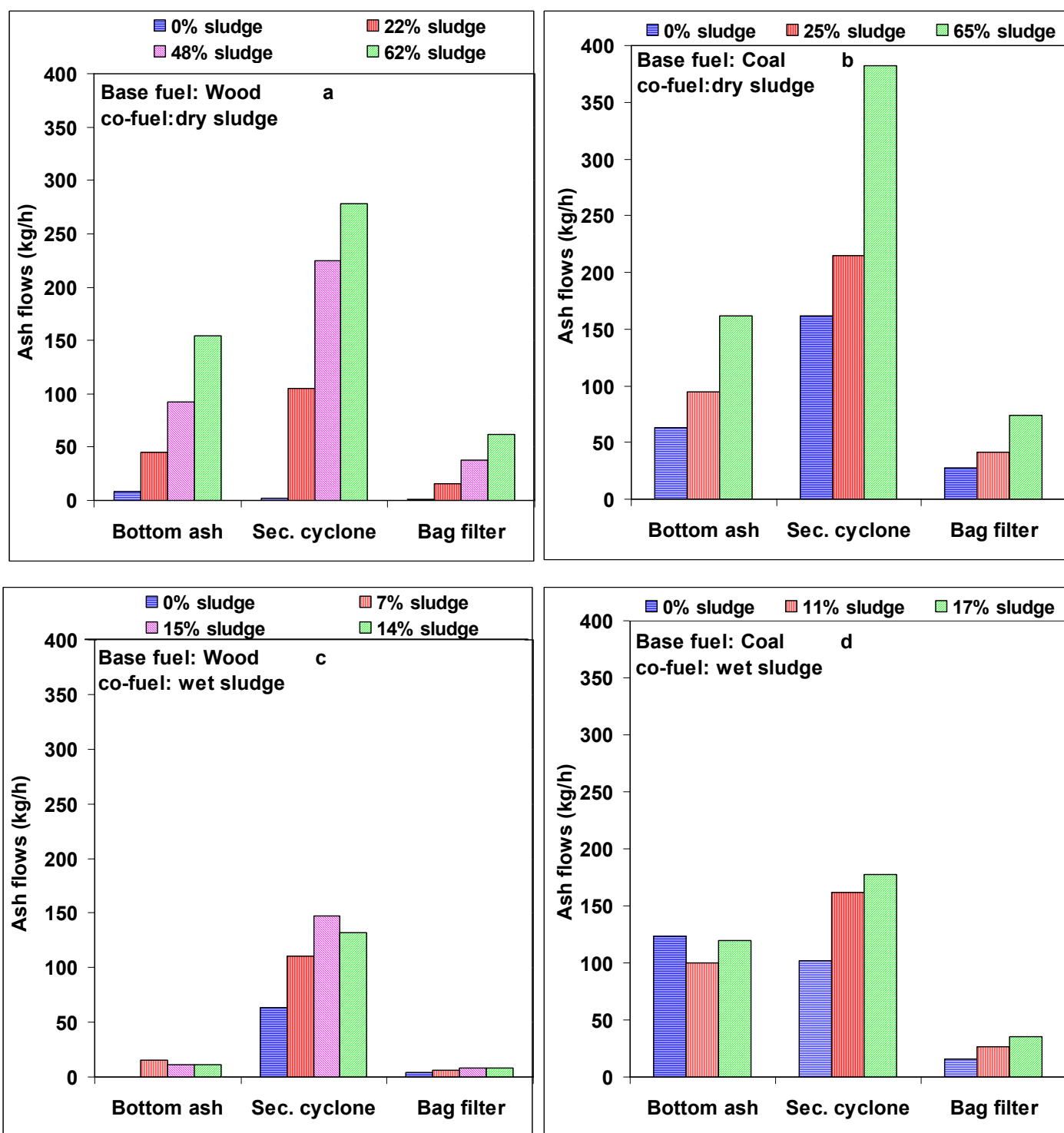
■ Ash ▲ Hg ◆ Cd ▼ Pb ● Cr ▲ Cu ✱ Ni ■ Zn + P

Figurer



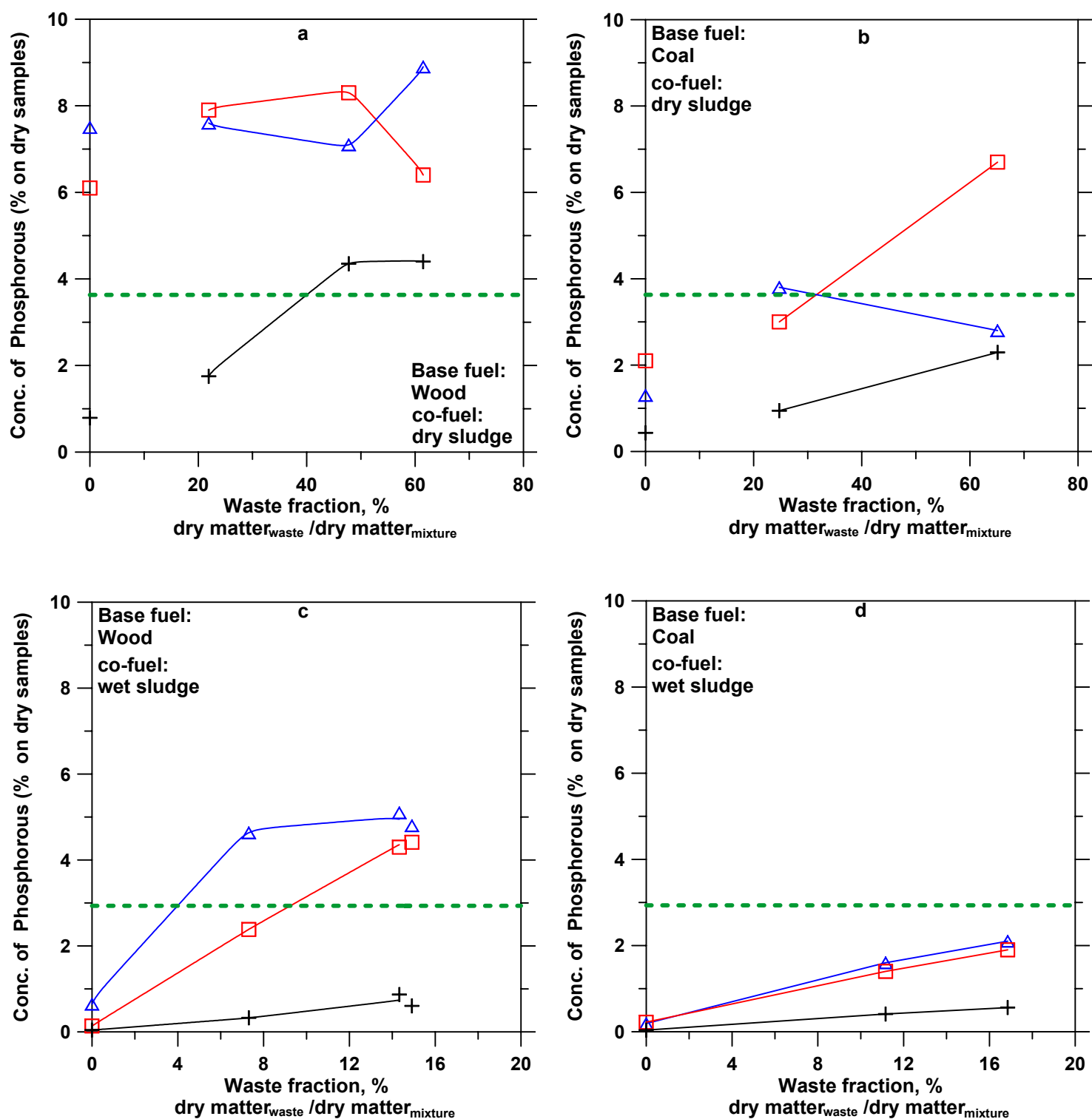
Figur 3 a–d. Askåtervinningsgrad (ut/in*100). Första försöksserien med förtorkat slam som tillsattsbränsle, Figur a, b. Andra försöksserien med mekaniskt avvattnat slam som tillsattsbränsle, Figur c, d. Träpellets som basbränsle i Figur a, c. Kol som basbränsle i Figur b, d.

Figurer



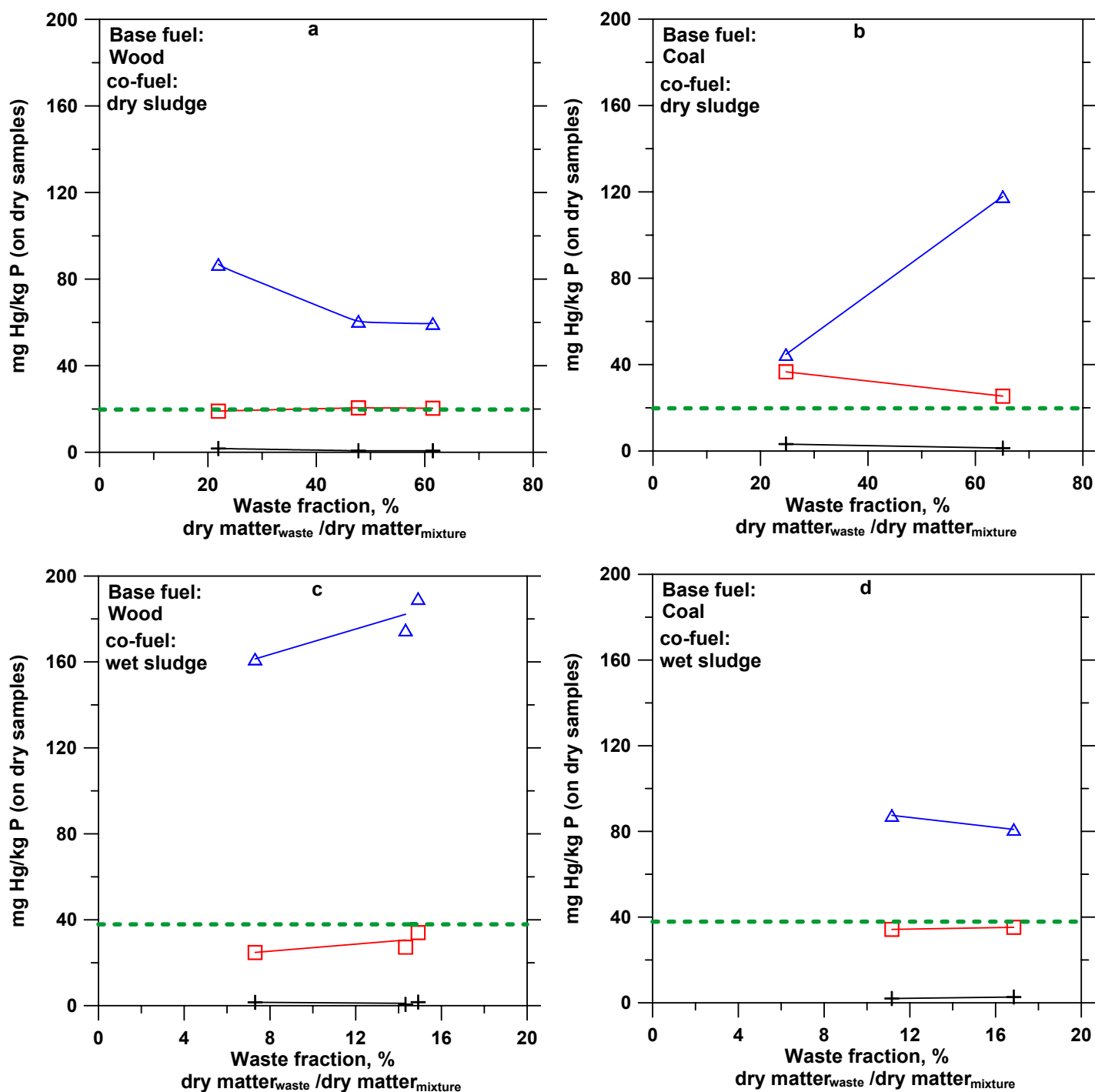
Figur 4 a–d. Flödet av fast material genom pannan. Första försöksserien med förtorkat slam som tillsattsbränsle, Figur a, b. Andra försöksserien med mekaniskt avvattnad slam som tillsattsbränsle, Figur c, d. Träpellets som basbränsle i Figur a, c. Kol som basbränsle i Figur b, d.

Figurer



Figur 5 a–d. Jämförelse av koncentrationen av fosfor i kommunalt avloppsslam och askprover tagna från det textila spärrfiltret, sekundär cyklonen och bottenaskan. Första försöksserien med förtorkat slam som tillsattsbränsle, Figur a, b. Andra försöksserien med mekaniskt avvattnat slam som tillsatts, Figur c, d. Träpellets som basbränsle i Figur a, c. Kol som basbränsle i Figur b, d.

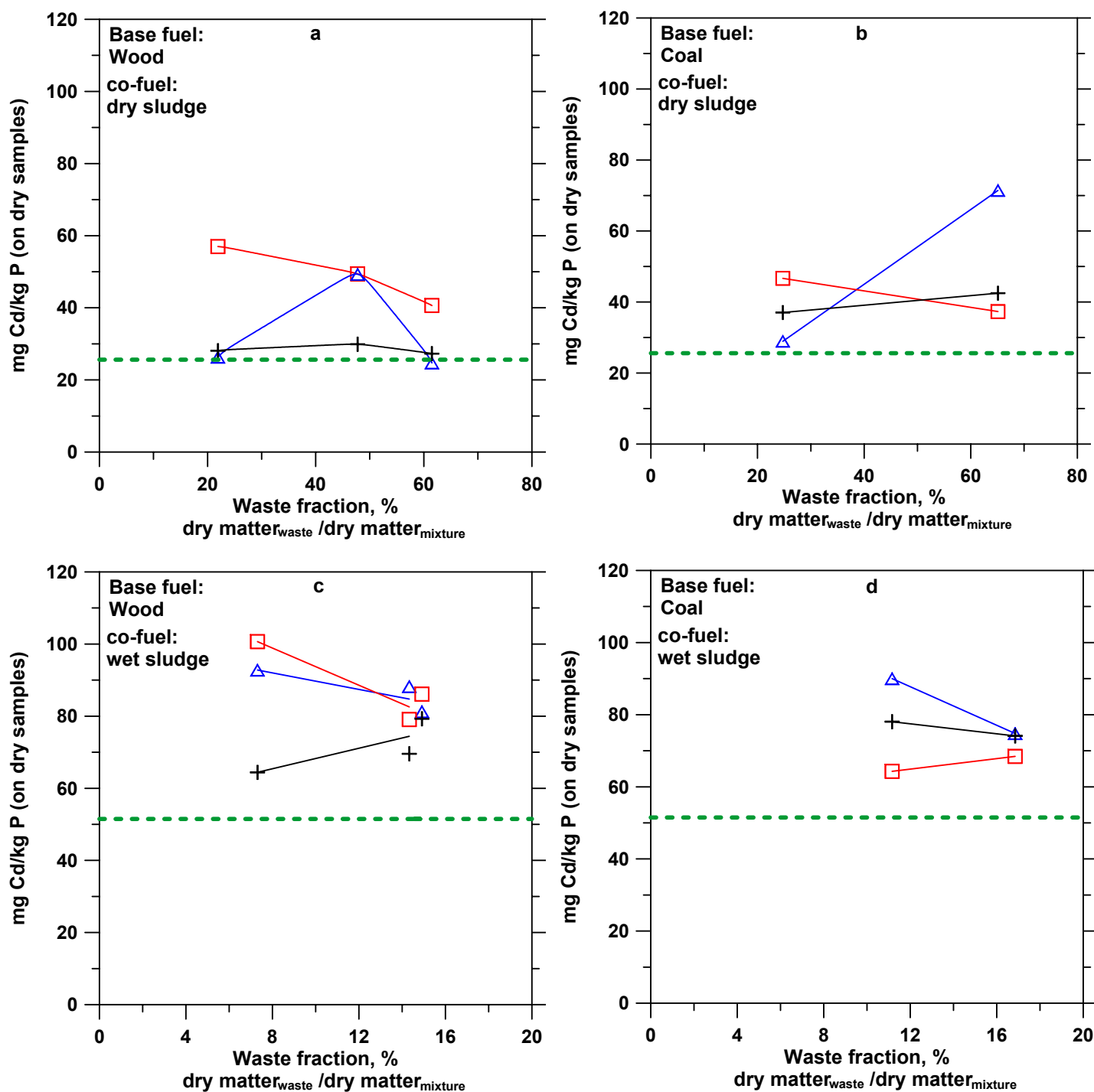
Figurer



Figur 6 a–d. Jämförelse av förhållandet Hg/P i kommunalt avloppsslam och askprover tagna från det textila spärrfiltret, sekundäracyklonen och bottenaskan. Första försöksserien med förtorkat slam som tillsattsbränsle, Figur a, b. Andra försöksserien med mekaniskt avvattnat slam som tillsattsbränsle, Figur c, d. Träpellets som basbränsle i Figur a, c. Kol som basbränsle i Figur b, d.

△ Bag filter ash □ Sec. cyclone ash + Bottom ash - - - Sewage Sludge

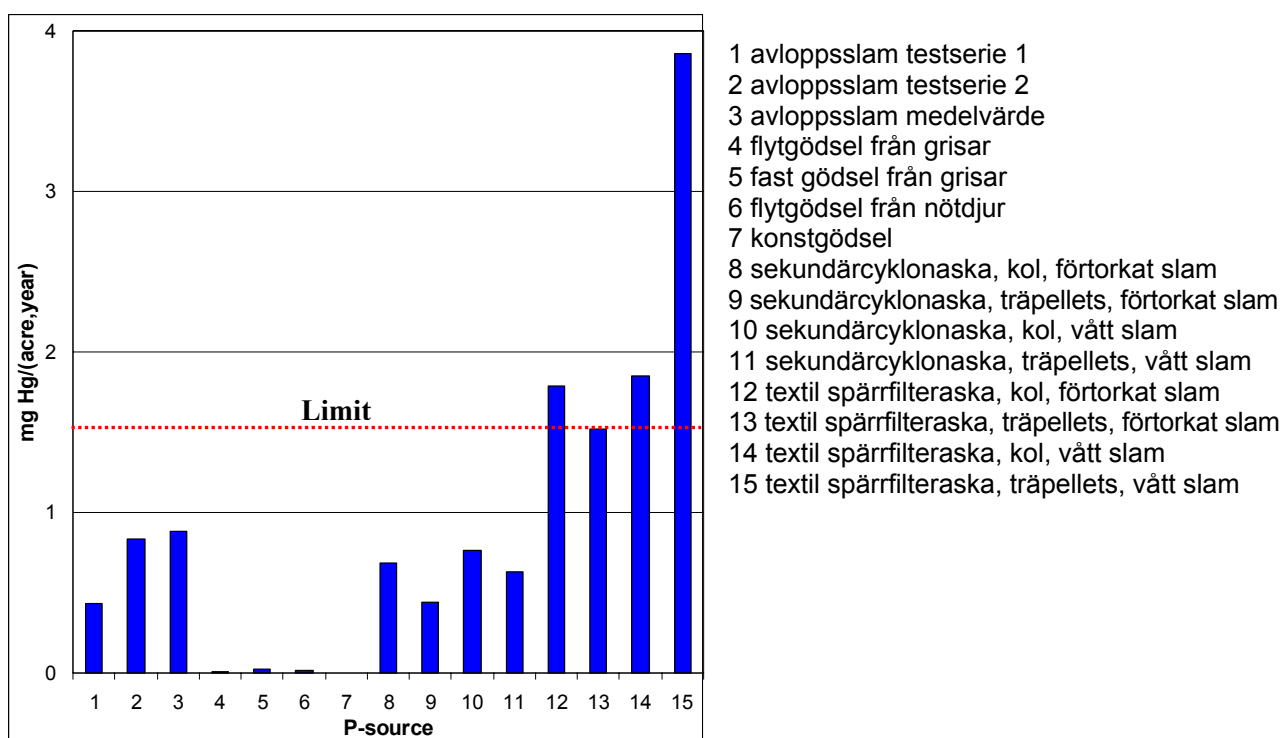
Figurer



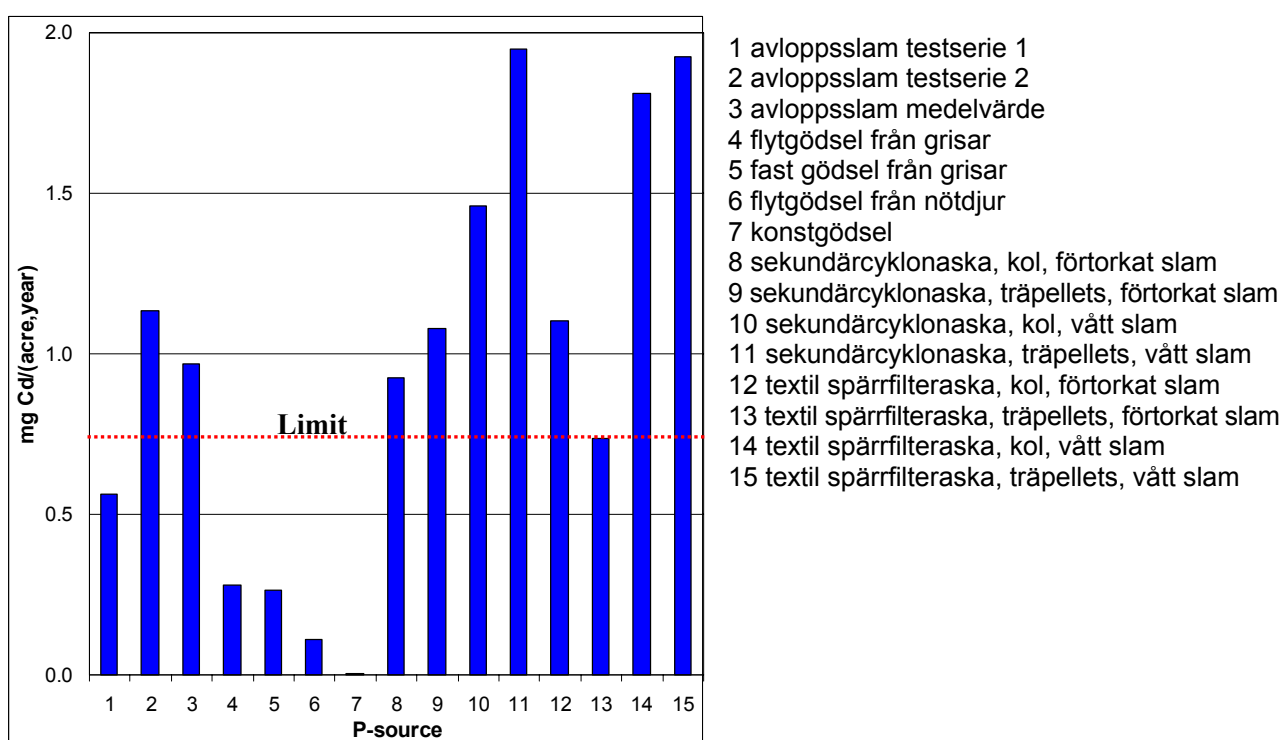
Figur 7 a–d. Jämförelse av förhållandet Cd/P i kommunalt avloppsslam och askprover tagna från det textila spärrfiltret, sekundäracyklonen och bottenaskan. Första försöksserien med förtorkat slam som tillsattsbränsle, Figur a, b. Andra försöksserien med mekaniskt avvattnad slam som tillsattsbränsle, Figur c d. Träpellets som basbränsle i Figur a, c. Kol som basbränsle i Figur b, d.

$\triangle$ Bag filter ash $\square$ Sec. cyclone ash $+$ Bottom ash --- Sewage Sludge

Figurer

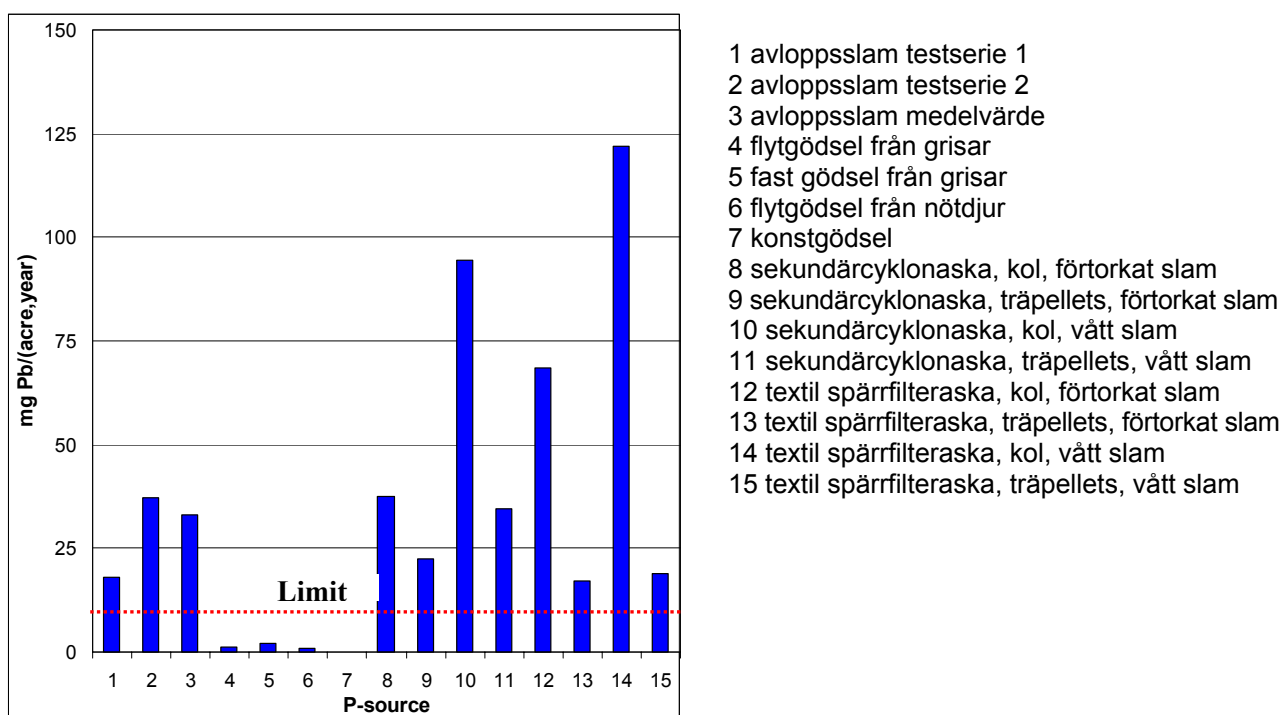


Figur 8 a. Kontaminering av kvicksilver när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.

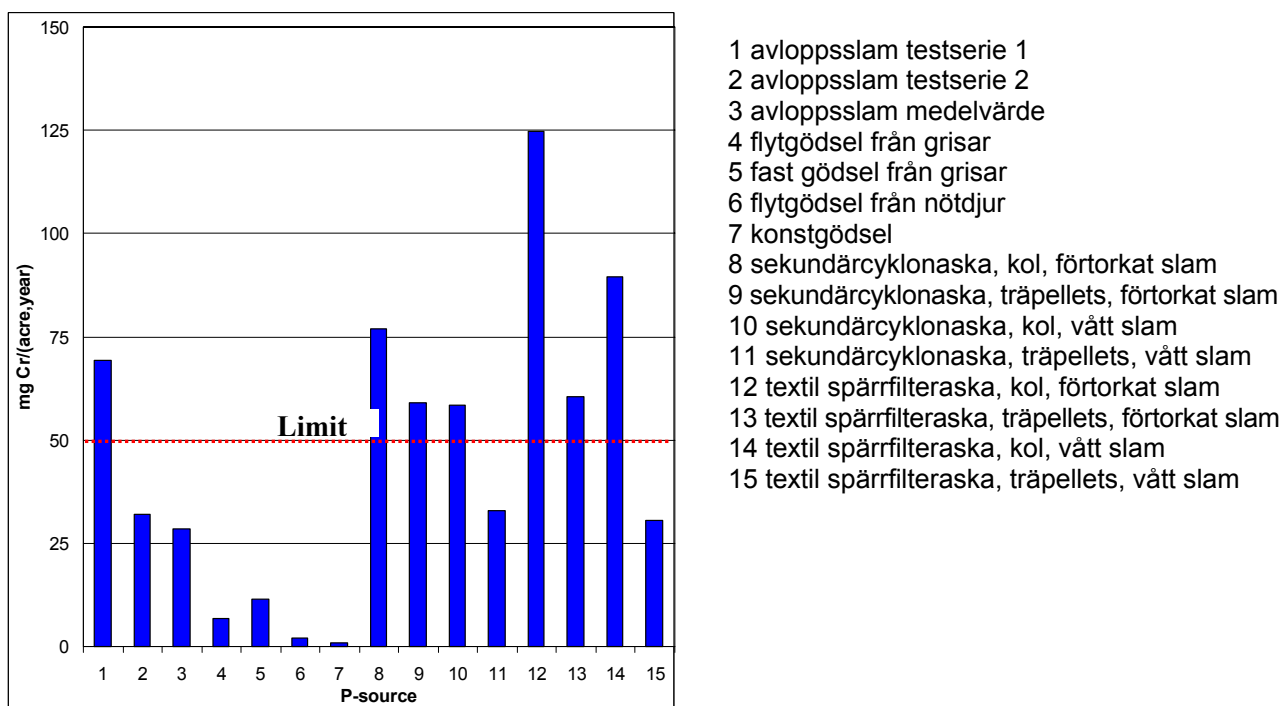


Figur 8 b. Kontaminering av kadmium när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.

Figurer

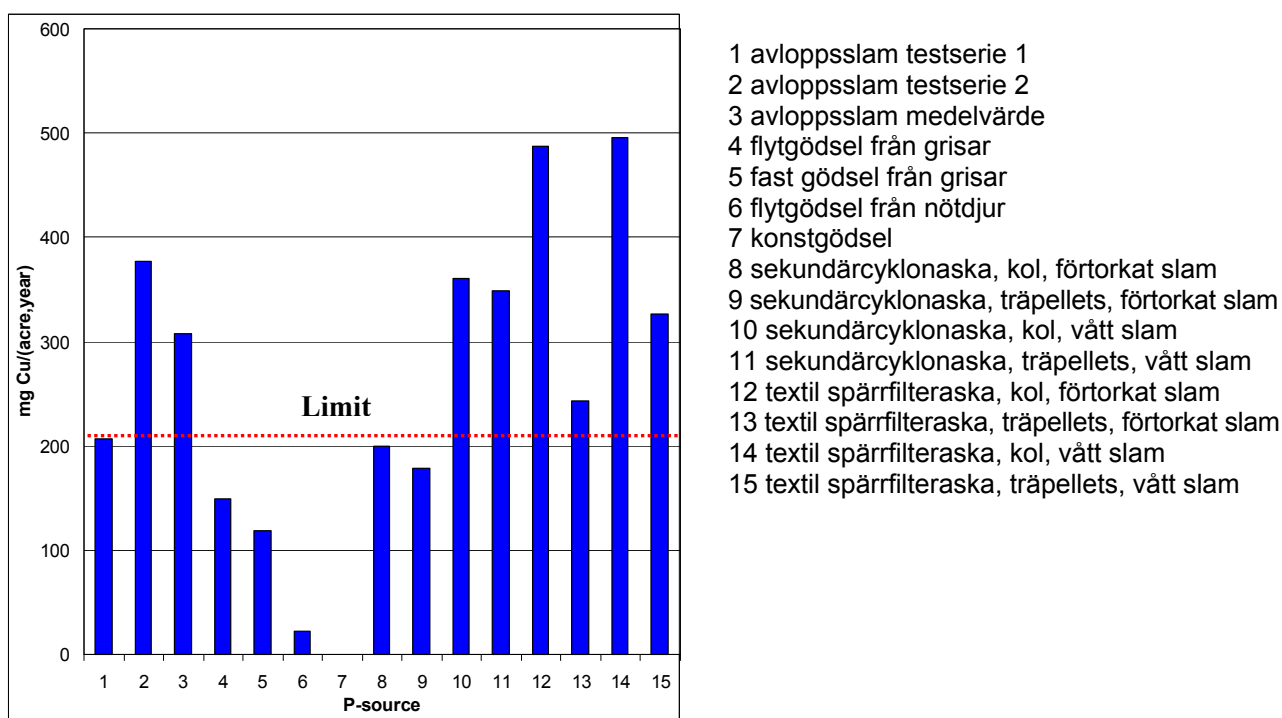


Figur 8 c. Kontaminering av bly när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.

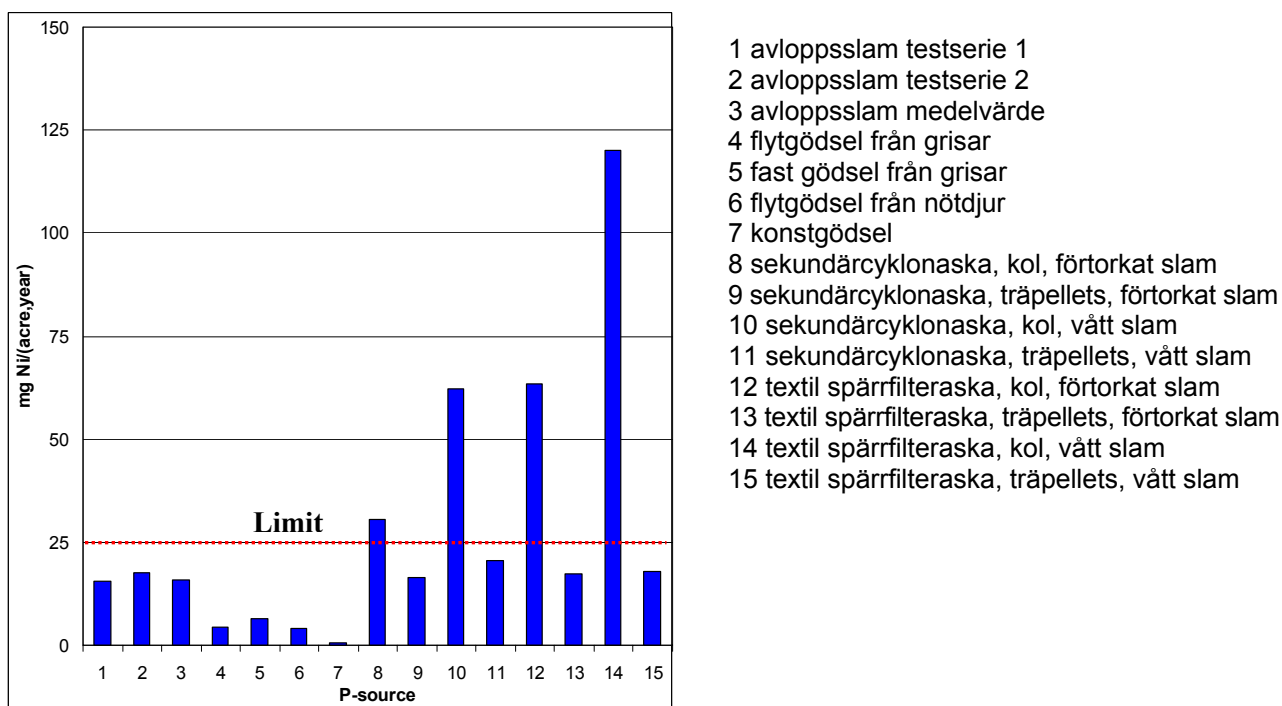


Figur 8 d. Kontaminering av krom när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.

Figurer

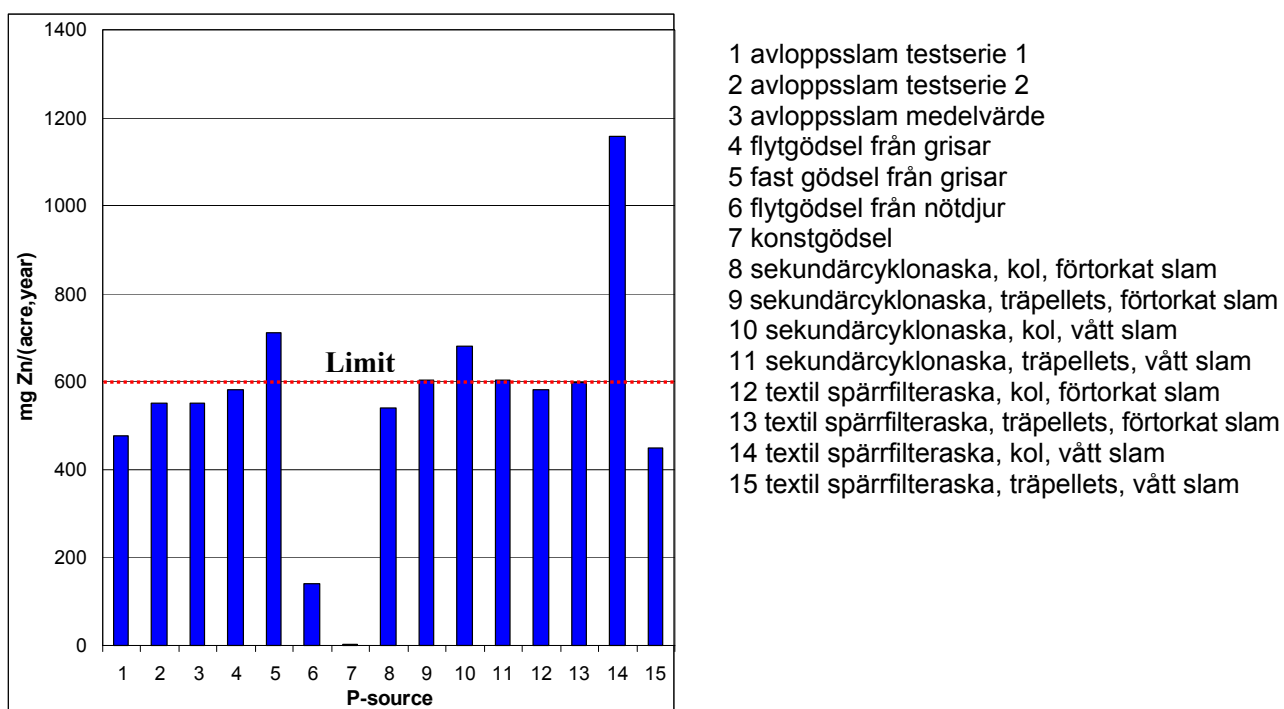


Figur 8 e. Kontaminering av koppar när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.



Figur 8 f. Kontaminering av nickel när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.

Figurer



Figur 8 g. Kontaminering av nickel när 22 kg fosfor tillförs till en hektar under ett år. Jämförelse mellan olika P-källor. 1-3 avloppsslam, 4-6 naturgödsel, 7 konstgödsel, 10-15 flygaska.

Bilaga 1.

Tabell A1:a. Spårelement och oorganiska komponenter beräknat på torrt askprov. Bottenaskprover från första försöksserien.

Base fuel	coal**	coal	coal	wood**	wood	wood	wood
Co-fuel	none	dry sludge	dry sludge	none	dry sludge	dry sludge	dry sludge
Waste fraction*	0	25	65	0	22	48	62
Ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash
Trace elements (mg/kg dry ash)							
Hg	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Cd	0.35	0.35	0.98	0.59	0.49	1.3	1.2
Pb	27	25	32	5.0	12	29	28
Cr	51	59	158	41	66	105	115
Cu	60	125	296	139	245	415	395
Mn	470	485	481	1350	1048	605	600
Co	17	13	10	6.7	7.9	7.8	8.9
Ni	51	46	40	28	30	32	33
As	9.0	7.6	9.2	6.2	8.2	8.2	8.2
Sb	0.7	0.8	1.9	0.7	1.4	2.5	2.4
V	155	110	100	49	67	54	69
Tl	0.16	0.17	0.15	0.004	0.03	0.07	0.08
Zn	215	360	870	350	525	1250	1250
Main elements g/kg dry ash							
K	10	9.4	9.5	8.3	7.8	7.5	7.8
Na	1.7	1.9	3.1	2.3	2.1	3.4	3.4
Al	59	55	54	19	25	32	36
Si	181	176	148	316	262	160	120
Fe	27	35	58	19	39	78	88
Ca	157	173	170	99	101	158	177
Mg	7.5	8.1	8.0	5.1	5.9	7.7	8
P	4.3	9.5	23	7.9	18	44	44
Ti	3.2	3.2	4.0	1.9	2.6	4.9	4.8
Combustibles wt-% on dry ash	3.1	0.5	1.1	0.10	0.10	0.13	0.10

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

** Test performed to close a test with sludge supply

Bilaga 1.

Tabell A1:b. Spårelement och oorganiska komponenter beräknat på torrt askprov. Bottenaskprover från andra försöksserien.

Base fuel	coal	coal	coal	wood**	wood	wood	wood
Co-fuel	none	wet sludge	wet sludge	none	wet sludge	wet sludge	wet sludge
Waste fraction*	0	11	17	0	7	15	14
Ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash	bottom ash
Trace elements (mg/kg dry ash)							
Hg	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Cd	0.37	0.32	0.42	0.08	0.21	0.48	0.61
Pb	26	18	22	5.5	5.0	11	14
Cr	37	25	26	20	13	21	20
Cu	37	83	114	15	50	93	143
Mn	572	442	467	510	868	605	873
Co	19	13	12	6.7	2.1	4.9	4.0
Ni	46	33	31	18	11	30	14
As	7.2	5.8	6.6	1.7	1.8	2.0	3.2
Sb	4.9	4.4	4.5	2.0	2.3	2.1	2.6
V	74	50	51	25	6.9	16	12
Tl	0.09	0.11	0.13	0.02	0.03	0.05	0.05
Zn	94	131	173	68	97	196	229
Se	0.46	0.35	0.39	0.12	0.07	0.09	0.18
Main elements g/kg dry ash							
K	10	12	12	15	6.0	9.6	7.8
Na	1.3	2.7	2.3	1.9	1.0	1.7	2.3
Al	48	62	61	76	6.9	38	14
Si	300	180	203	259	402	374	385
Fe	18	29	31	24	9.4	20	20
Ca	89	171	153	96.7	53	30	69
Mg	5.5	8.4	8.1	8.4	3.0	3.8	4.3
P	0.4	4.1	5.6	0.4	3.3	6.1	8.7
Ti	2.4	3.1	2.9	3.8	0.5	2.0	0.8
Combustibles wt-% on dry ash	2.0	0.5	3.0	0.25	0.00	0.20	0.00

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

** Test performed to close a test with pure coal and lime supply

Bilaga 1.

Tabell A1:c. Spårelement och oorganiska komponenter beräknat på torrt askprov. Sekundärcyklonaska från första försöks-serien.

Base fuel	coal**	coal	coal	wood**	wood	wood	wood
Co-fuel	none	dry sludge	dry sludge	none	dry sludge	dry sludge	dry sludge
Waste fraction*	0	25	65	0	22	48	62
Ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash
Trace elements (mg/kg dry ash)							
Hg	1.1	1.1	1.7	0.89	1.5	1.7	1.3
Cd	1.4	1.4	2.5	5.7	4.5	4.1	2.6
Pb	80	70	72	76	79	75	73
Cr	110	120	200	160	200	210	190
Cu	300	290	570	500	600	690	540
Mn	450	490	550	2500	1200	1100	680
Co	17	16	18	15	15	15	16
Ni	60	55	63	55	55	58	54
As	7.1	5.7	5.7	9.5	5.1	6.4	5.6
Sb	1.1	0.8	2.8	2.1	3.1	3.6	2.3
V	150	130	99	110	74	83	95
Tl	0.86	0.66	0.45	0.80	0.54	0.46	0.47
Zn	580	760	1600	2300	2200	2300	1700
Main elements g/kg dry ash							
K	10	9.0	10	25	14	13	12
Na	2.7	2.8	4.3	7.5	5	5.5	4.6
Al	63	63	63	49	54	56	57
Si	90	85	86	107	84	88	87
Fe	62	79	149	128	170	164	143
Ca	65	73	78	115	95	93	80
Mg	10	10	11	12	12	12	11
P	21	30	67	61	79	83	64
Ti	4.4	5.0	8.0	6.8	8.3	9.0	7.4
Combustibles wt-% on dry ash	15.9	17.9	9.4	2.9	2.2	1.9	4.0

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

** Test performed to close a test with sludge supply

Bilaga 1.

Tabell A1:d. Spårelement och oorganiska komponenter beräknat på torrt askprov. Sekundärcyklonprov från andra försöks-serien.

Base fuel	coal	coal	coal	wood**	wood	wood	wood
Co-fuel	none	wet sludge	wet sludge	none	wet sludge	wet sludge	wet sludge
Waste fraction*	0	11	17	0	7	15	14
Ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash	sec. cyclone ash
Trace elements (mg/kg dry ash)							
Hg	0.21	0.48	0.67	0.01	0.59	1.5	1.17
Cd	0.34	0.90	1.3	0.81	2.4	3.8	3.4
Pb	64	68	71	12	38	66	70
Cr	36	42	44	17	37	54	73
Cu	61	245	291	20	389	591	766
Mn	509	609	632	1130	1370	1480	1560
Co	16	19	19	5.9	9.7	14	17
Ni	38	46	45	17	27	34	39
As	3.7	5.2	6.1	1.7	4.0	5.2	6
Sb	2.5	4.2	4.3	2.0	3.4	5.4	5.4
V	71	77	69	23	23	47	41
Tl	0.26	0.35	0.28	0.09	0.15	0.25	0.28
Zn	91	419	503	73	685	1070	1180
Sn	3.7	3.3	3.3	0.27	1.1	2.8	2.2
Main elements g/kg dry ash							
K	7.8	10	11	8.3	13	14	16
Na	2.1	3.1	3.6	1.2	3.5	5.5	5.5
Al	52	63	64	22	31	58	56
Si	79	98	102	367	302	212	199
Fe	31	48	57	16	51	85	89
Ca	65	70	64	45	61	66	79
Mg	11	11	11	5.0	6.2	8.8	8.9
P	2.2	14	19	1.4	24	44	43
Ti	2.6	3.2	3.1	1.5	2.0	3.2	3.1
Combustibles wt-% on dry ash	49	39	34	3.0	0.6	2.1	0.7

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

** Test performed to close with pure coal and lime supply

Bilaga 1.

Tabell A1:e. Spårelement och oorganiska komponenter beräknat på torrt askprov. Textilt spärrfilterprov från första försöks-serien.

Co-fuel Waste fraction* Ash	none 0 Bag house filter ash	dry sludge 25 Bag house filter ash	dry sludge 65 Bag house filter ash	none 0 Bag house filter ash	dry sludge 22 Bag house filter ash	dry sludge 48 Bag house filter ash	dry sludge 62 Bag house filter ash
Trace elements (mg/kg dry ash)							
Hg	1.3	1.7	3.3	4.9	6.6	4.3	5.3
Cd	1.2	1.1	2.0	3.2	2.0	3.5	2.2
Pb	120	120	86	68	55	63	66
Cr	110	160	200	210	220	180	250
Cu	290	530	850	810	910	730	970
Mn	530	550	580	5000	3700	5800	1200
Co	44	38	25	18	17	17	17
Ni	110	110	80	64	60	60	64
As	13	15.0	20.0	14	14	13	21
Sb	0.6	1.3	3.9	4.6	4.2	4.2	5.5
V	360	310	160	130	97	120	100
Tl	0.94	0.88	0.66	2.4	2.0	2.4	0.74
Zn	1900	1000	1900	2100	2000	2100	2300
Main elements g/kg dry ash							
K	15	13.0	8	18	17	22	11
Na	3.3	3.3	3.1	5.5	5	6.2	4.5
Al	101	91	44	53	54	50	57
Si	136	116	98	68	68	67	70
Fe	55	100	63	153	163	142	187
Ca	81	89	218	124	118	130	101
Mg	11	11	8	16	15	17	13
P	13	38	28	75	76	71	89
Ti	6.6	8.0	3.8	8.3	8.7	7.7	10
Combustibles wt-% on dry ash	14.7	10.5	3.8	4.0	4.8	4.3	1.6

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

** Test performed to close a test with sludge supply

Bilaga 1.

Tabell A1:f. Spårelement och oorganiska komponenter beräknat på torrt askprov. Textilt spärrfilterprov från andra försöks-serien

Base fuel	coal*	coal	coal	wood**	wood	wood	wood
Co-fuel	none	wet sludge	wet sludge	none	wet sludge	wet sludge	wet sludge
Waste fraction*	0	11	17	0	7	15	14
Ash	bag house	bag house	bag house	bag house	bag house	bag house	bag house
	filter ash	filter ash	filter ash	filter ash	filter ash	filter ash	filter ash
Trace elements (mg/kg dry ash)							
Hg	0.64	1.4	1.7	0.54	7.5	9.1	8.9
Cd	1.3	1.4	1.6	18	4.3	3.9	4.5
Pb	122	102	99	138	37	42	47
Cr	84	71	78	96	68	63	70
Cu	154	387	437	167	717	654	784
Mn	727	728	768	12800	8480	6820	6140
Co	51	46	46	42	17	20	19
Ni	99	100	98	96	35	47	37
As	10	14	17	16	25	35	26
Sb	4.9	7.3	7.7	5.4	5.8	7.8	7.2
V	205	175	180	150	62	87	70
Tl	0.51	0.42	0.35	1.5	0.69	0.40	0.7
Zn	185	506	628	55	889	1010	1050
Sn	7.7	6.5	6.5	8.3	8.1	8.0	8.2
Main elements g/kg dry ash							
K	14	14	13	18	27	21	27
Na	3.1	3.7	4.0	2.0	4.5	4.4	4.8
Al	94	94	92	57	50	62	56
Si	130	132	131	90	91	100	92
Fe	37	58	66	31	89	95	102
Ca	80	97	97	196	176	128	159
Mg	12	12	12	27.2	21	16	18
P	1.9	16	21	6.5	46	48	51
Ti	5.5	5.4	5.3	3.7	2.9	3.3	3.2
Combustibles wt-% on dry ash	24	15	14	12	3.3	5.6	2.6

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

** Test performed to close a test pure coal and lime supply

Bilaga 2.

Tabell A2:a. Koncentrationen av Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn i relation till P innehållet (på torrt prov) för bottenaskproverna. Försöksserie 1 and 2.

Base fuel Co-fuel Waste fraction* Ash	coal none 0 bottom ash	coal dry sludge 25 bottom ash	coal dry sludge 65 bottom ash	wood none 0 bottom ash	wood dry sludge 22 bottom ash	wood dry sludge 48 bottom ash	wood dry sludge 62 bottom ash
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	7.0	3.2	1.3	3.8	1.7	0.69	0.68
Cd	81	37	42	75	28	30	27
Pb	6221	2593	1378	633	700	667	625
Cr	11919	6190	6885	5127	3771	2414	2602
Cu	13953	13228	12908	17532	14000	9540	8977
Ni	11919	4815	1754	6962	1714	736	750
Zn	50000	38095	28105	44304	30000	28736	28409
Base fuel Co-fuel Waste fraction* Ash	coal none 0 bottom ash	coal wet sludge 11 bottom ash	coal wet sludge 17 bottom ash	wood none 0 bottom ash	wood wet sludge 7 bottom ash	wood wet sludge 15 bottom ash	wood wet sludge 14 bottom ash
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	41	2.0	2.7	22	1.5	1.7	0.6
Cd	1000	78	74	180	64	79	70
Pb	69863	4268	3839	12360	1534	1792	1609
Cr	101370	5976	4554	44944	4049	3386	2322
Cu	101370	20122	20268	33708	15184	15277	16437
Ni	124658	7927	5446	40449	3482	4872	1586
Zn	356164	54878	46429	451910	71933	42403	45977

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

Tabell A2:b. Koncentrationen av Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn i relation till P innehållet (på torrt prov) för sekundäracyklonproverna. Försöksserie 1 och 2.

Base fuel Co-fuel Waste fraction* Ash	coal none 0 sec. cyclone ash	coal dry sludge 25 sec. cyclone ash	coal dry sludge 65 sec. cyclone ash	wood none 0 sec. cyclone ash	wood dry sludge 22 sec. cyclone ash	wood dry sludge 48 sec. cyclone ash	wood dry sludge 62 sec. cyclone ash
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	52	37	25	15	19	20	20
Cd	67	47	37	93	57	49	41
Pb	3810	2333	1075	1246	1000	904	1141
Cr	5238	4000	2985	2623	2532	2530	2969
Cu	14286	9667	8507	8197	7595	8313	8438
Ni	2857	1833	940	902	696	699	844
Zn	27619	25333	23881	93	27848	27711	26563
Base fuel Co-fuel Waste fraction* Ash	coal none 0 sec. cyclone ash	coal wet sludge 11 sec. cyclone ash	coal wet sludge 17 sec. cyclone ash	wood none 0 sec. cyclone ash	wood wet sludge 7 sec. cyclone ash	wood wet sludge 15 sec. cyclone ash	wood wet sludge 14 sec. cyclone ash
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	95	34	35	7.2	25	34	27
Cd	155	64	68	587	101	86	79
Pb	29091	4857	3737	8696	1594	1496	1628
Cr	16364	3000	2316	12319	1552	1224	1698
Cu	27727	17500	15316	14493	16317	13392	17814
Ni	17273	3286	2368	12319	1133	770	907
Zn	68182	32857	28947	110000	31091	25620	25581

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

Bilaga 2.

Tabell A2:c. Koncentrationen av Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn i relation till P innehållet (på torrt prov) för textila spärrfilterproverna. Försöksserie 1 och 2.

Base fuel Co-fuel Waste fraction* Ash	coal none 0 bag house filter ash	coal dry sludge 25 bag house filter ash	coal dry sludge 65 bag house filter ash	wood none 0 bag house filter ash	wood dry sludge 22 bag house filter ash	wood dry sludge 48 bag house filter ash	wood dry sludge 62 bag house filter ash
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	100	45	118	65	87	61	60
Cd	92	29	71	43	26	49	25
Pb	9231	3158	3071	907	724	887	742
Cr	8462	4211	7143	2800	2895	2535	2809
Cu	22308	13947	30357	10800	11974	10282	10899
Ni	8462	2895	2857	853	789	845	719
Zn	35385	26316	26429	28000	26316	29577	25843
Base fuel Co-fuel Waste fraction* Ash	coal none 0 bag house filter ash	coal wet sludge 11 bag house filter ash	coal wet sludge 17 bag house filter ash	wood none 0 bag house filter ash	wood wet sludge 7 bag house filter ash	wood wet sludge 15 bag house filter ash	wood wet sludge 14 bag house filter ash
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	337	88	81	84	161	190	175
Cd	700	90	75	2791	93	81	88
Pb	64211	6375	4714	21395	798	875	922
Cr	44211	4438	3714	14884	1467	1313	1373
Cu	81053	24188	20810	25891	15473	13625	15373
Ni	52105	6250	4667	14884	755	979	725
Zn	78947	78947	26190	23535	15995	23554	21569

*dry matter(waste)/dry matter (mixture),%

Tabell A2:d. Koncentration av Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni och Zn i relation till P innehållet (på torrt prov) för avloppsslam, stallgödsel och konstgödsel

P-source	sewage sludge series 1	sewage sludge series 2	sewage sludge average*	liquid manure from pigs	solid manure from pigs	liquid manure from cattle**	artificial fertilizer***
P-concentration (g/kg)	36	29	27	22	21	24	40
Trace elements (mg/kg P)							
Hg	20	38	40	0.41	0.90	0.58	0.04
Cd	26	51	44	13	12	5.0	0.24
Pb	815	1693	1500	54	95	41	2.0
Cr	3150	1449	1300	309	524	96	37
Cu	9409	17153	14000	6773	5381	1000	6.9
Ni	713	795	720	205	290	192	22
Zn	21717	25011	25000	26455	32381	6417	76

* Average of analysis of sludge from 48 different waste water treatment plants in Sweden (ref. 6)

** milk producing cows (ref. 6)

*** NPK-S 21-4-7 from Hydro Agri (ref. 6)



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08-506 002 00

Fax 08-506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

ISBN: 91-85159-16- 6