

# Kritiska metaller i svenska avfallsaskor

Inge Johansson, Eskil Sahlin, Bo von Bahr,  
Johanna Björkmalm, Jelena Todorovic Olsson



# **Kritiska metaller i svenska avfallsaskor**

## **The content of critical elements in residues from Swedish waste-to-energy plants**

Inge Johansson, Eskil Sahlin, Bo von Bahr,  
Johanna Björkmalm, Jelena Todorovic Olsson

Projektnummer WR-56  
År: 2013

**WASTE REFINERY**  
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut  
Box 857, 501 15 Borås  
[www.wasterefinery.se](http://www.wasterefinery.se)  
[wasterefinery@sp.se](mailto:wasterefinery@sp.se)  
ISSN 1654-4706



## Sammanfattning

EU-kommissionen har i en rapport från 2010 pekat ut 14 kritiska metaller och metallgrupper. Dessa är sådana som bedöms som vitala för utvecklingen inom exempelvis datorer, elektronik och elbilar och där användningen väntas öka markant inom de närmaste decennierna. Dessutom är de kända tillgångarna av flera av dessa ämnen koncentrerade till enskilda länder utanför EU.

Kunskapen om dessa ämnens förekomst i askor från avfallsförbränning är väldigt begränsad och samma sak gäller exempelvis fördelningen av ämnena mellan flyg- och bottenaska. Det finns en del värden rapporterade i litteraturen men ingen större genomgång har gjorts för att täcka de kritiska metallerna i ett antal anläggningar. En bättre kunskap om innehållet i askorna är en förutsättning för att senare kunna välja behandlingsmetoder av askorna och kunna utnyttja det potentiella mervärde som kan finnas i form av dessa ämnen.

Projektets huvudsyfte har varit att se hur mycket kritiska metaller som finns i askor från svenska avfallsförbränningsanläggningar. Målet har varit att se vilka kritiska metaller som går att analysera i askorna och sedan kvantifiera de som är möjliga att analysera. Resultaten skulle också generaliseras och tillämpas på Sverige-nivå för att se vilka mängder och vilka eventuella ekonomiska värden dessa mängder kan representera. Målet var också att mängderna skulle kunna relateras till användningen i Sverige.

I projektet har flyg och bottenaskor från 10 svenska anläggningar analyserats (7 roster och 3 fluidbädd). De flesta proven togs under 2-3 veckor och målet var att få sammanhängande flyg- och bottenaskprov.

Analyserna visade att halterna av de flesta kritiska metallerna är under den genomsnittliga bakgrundshalten i jordskorpan. Platinametallerna och indium fanns i halter under rapportgränsen medan guld i några enstaka fall fanns i detekterbara mängder. Antimon och silver fanns dock i betydligt högre halter än bakgrundshalten. Trots de generellt låga halterna representerar de kritiska metallerna totalt ett värde om ca 1,3 miljarder kronor årligen om man räknar på de askmängder som genereras från avfallsförbränning i Sverige.

Av de kritiska metallerna är det några få som står för huvuddelen av den ekonomiska potentialen. Dessa är lutetium, magnesium, skandium och tulium. Av dessa är det magnesium som finns i relativt stora mängder medan de andra har ett väldigt högt pris så även små mängder ger en hög potential.

Projektet har gett en överblick över de kritiska metallerna i askorna från ett stort antal svenska anläggningar. I dagsläget finns det inga motsvarande undersökningar publicerade i den vetenskapliga litteraturen. Projektet har gett en bra överblick över vilka metaller som eventuellt kan vara värda att arbeta vidare med och därmed en grund för prioritering av utvecklingsresurser.

Projektet har uppfyllt de uppställda målen väl även om det inte gått att relatera mängderna i askan till mängderna som används i Sverige.

**Nyckelord:** kritiska metaller, aska, avfallsförbränning

## Summary

In 2010, the European Commission published a report where they pinpointed a number of elements that they judged critical for the economic development within EU. These elements are vital for the development of a number of important products such as computer, consumer electronics and electrical vehicles. The supply risk is one of the aspects of the critical classification, since EU is largely dependent on import for all of the elements.

The knowledge of the presence of critical elements in the residues from waste-to-energy plants is limited. There are values reported in literature, but no comprehensive studies have been made to investigate the concentrations in residues from a number of plants. A better knowledge of the content in the residues is vital in the choosing of treatment methods for the residues and also for the possibility to recover valuable resources from the residues.

The aim of the study was to determine how large quantities of critical metals that are present in residues from Swedish Waste-to-Energy plants. Concrete goals have been to determine which critical metals were possible to analyse in the residues and then to quantify those. The results should be generalized to a national level to determine what amounts that are present and what economic potential those represent. Ideally the content should also be related to the amounts being used in Sweden.

In the project, 10 plants have contributed with both fly and bottom ash. These represent 7 grate fired boilers and 3 fluidised bed boilers. The sampling period was generally 2-3 weeks, with the aim of sampling fly ash and bottom ash during the same period.

The results from the analyses showed that the concentration levels of most of the critical elements were below the average concentration in the upper earth crust. Indium and the platinum metals were present in concentrations lower than the report limit of the used method. In the case of gold, there were some results above the report limit, but most were below. Antimony and silver are the elements present in concentrations significantly higher than the average in the earth crust. Despite the low content, the critical metals in the residues still represent a value of 1.3 billion SEK each year.

The most part of the economic potential comes from a limited number of metals; these are lutetium, magnesium, scandium and thulium. Magnesium is present in large volumes while the others have a very high market price (in pure metallic form).

The project has given a good overview of the presence of the critical metals in residues from ten Swedish plants. Today there is no similar study published in the literature. The results also give an indication of which metals that represent the largest economic value, which is important when looking into future work on metal recycling from residues.

The projects have met the set goals with the exception of the relation to amounts of the critical metals used in Sweden. There was too little information available to make this comparison.

**Keywords:** critical elements, ashes, waste incineration, rare earth elements

## Förord

I denna rapport redovisas resultaten av projektet “Kritiska metaller i svenska avfallaskor”. Projektet har finansierats av Waste Refinery, Avfall Sverige, AB Fortum Värme, Borlänge Energi AB, Borås Energi & Miljö AB, EON Värme AB, Jönköping Energi AB, Renova AB, Sysav Utveckling AB, Tekniska verken i Linköping AB, Uddevalla Energi AB, Umeå Energi AB.

Under projektets gång har tre stora projektmöten hållits med deltagande projektpartners och finansörer. Dessa möten har hållits tillsammans med projekt WR 58 eftersom flera företag deltog i båda projekten. Mötena har varit väldigt värdefulla för projektet och vid dem har värdefulla synpunkter kring såväl utförande som resultat framkommit. Det har även gett en intressant inblick i det angränsande projektet (WR 58).

Representanter för projektpartners och finansörer har varit:

Peter Flyhammar och Johan Fagerqvist, Avfall Sverige  
Mathias Bjurman, Borlänge Energi  
Stefan Hjærtstam, Borås Energi & Miljö  
Bengt-Åke Andersson, Anna Jonasson, EON Värme  
Harald Svensson, Fortum Värme  
Agata Zietek, Jönköping Energi  
Karin Karlfeldt Fedje, Renova  
Erik Rasmussen, Stena Metall  
Raul Grönholm, Sysav Utveckling  
Stig-Olov Taberman, Tekniska verken i Linköping  
Fredrik Jostby, Uddevalla Energi  
Jennica Viksten, Umeå Energi

Ett stort tack till alla dessa representanter för den tid och det engagemang de lagt ner för att projektet skulle bli så bra som möjligt. Er kunskap, flexibilitet och diskussionsvilja har varit ovärderlig för projektet.

Ett extra tack till Anita Petterson och Karin Karlfeldt Fedje för det goda samarbetet med samordningen av mötena mellan WR 56 och WR 58.

Slutrapporten kommer att publiceras hos Waste Refinery och Avfall Sverige.

Inge Johansson, SP, projektledare  
Borås, december 2013

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b>1</b>
1.1	PROBLEMBESKRIVNING	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR	3
<b>2</b>	<b>BAKGRUND</b>	<b>4</b>
2.1	ASKOR FRÅN AVFALLSFÖRBRÄNNING	4
<b>3</b>	<b>MATERIAL OCH METODER</b>	<b>6</b>
3.1	MEDVERKANDE ANLÄGGNINGAR	6
3.2	PROVTAGNING	7
3.3	PROVBEREDNING	9
3.4	KEMISK ANALYS	11
3.5	LITTERATURSTUDIE OM FÖREKOMST OCH ANVÄNDNING	12
<b>4</b>	<b>LITTERATURSTUDIE KRITISKA METALLER</b>	<b>13</b>
4.1	ANVÄNDNING	13
4.2	FÖREKOMST OCH UTVINNING	15
4.3	ÅTERVINNING	17
4.4	METALLPRISER	18
4.5	KRITISKA METALLER I ASKOR FRÅN AVFALLSFÖRBRÄNNING	20
<b>5</b>	<b>RESULTAT</b>	<b>24</b>
5.1	VALIDERING	24
5.2	RESULTAT AV DE KEMISKA ANALYSERNA	24
5.3	GENERALISERING AV RESULTATEN TILL NATIONELL NIVÅ	36
5.4	EKONOMISK POTENTIAL	39
<b>6</b>	<b>RESULTATANALYS</b>	<b>40</b>
6.1	INNEHÅLLET AV KRITISKA METALLER I ASKOR	40
6.2	UPPSKALNING TILL SVERIGENIVÅ	45
6.3	EKONOMISK POTENTIAL OCH MÖJLIGHETER TILL ÅTERVINNING	46
<b>7</b>	<b>SLUTSATSER</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>LITTERATURREFERENSER</b>	<b>50</b>



---

## Bilagor

### A PROVTAGNINGSSINSTRUKTIONER SYSAV

- A.1 PROVTAGNING AV FLYGASKA FRÅN PANNA 3 OCH PANNA 4
- A.2 PROVTAGNING AV SLAGGRUS FRÅN PANNA 3 OCH PANNA 4

### B INFORMATION OM DE KRITISKA METALLERNA

- B.1 ANTIMON, SB
- B.2 BERYLLIUM, BE
- B.3 GALLIUM, GA
- B.4 GERMANIUM, GE
- B.5 KOBOLT, CO
- B.6 INDIUM, IN
- B.7 MAGNESIUM, MG
- B.8 NIOB, NB
- B.9 TANTAL, TA
- B.10 VOLFRAM, W
- B.11 PLATINAMETALLERNA
- B.12 SÄLLSYNTA JORDARTSMETALLER
- B.13 GULD, AU
- B.14 SILVER, AG
- B.15 KOPPAR, CU
- B.16 ZINK, ZN

### C METALLPRISER

### D RESULTAT AV DE KEMISKA ANALYSERNA

- D.1 HALTER KRITISKA METALLER I FLYGASKA FRÅN ROSTERANLÄGGNINGAR
- D.2 HALTER KRITISKA METALLER I FLYGASKA FRÅN FB-ANLÄGGNINGAR
- D.3 HALTER KRITISKA METALLER I BOTTENASKA FRÅN ROSTERANLÄGGNINGAR
- D.4 HALTER KRITISKA METALLER I BOTTENASKA FRÅN FB-ANLÄGGNINGAR
- D.5 HALTER AV KRITISKA METALLER I OLIKA FRAKTIONER AV RENOVAS BOTTENASKA
- D.6 BERÄKNADE TOTALA MEDELVÄRDEN FÖR KRITISKA METALLER I DE SVENSKA AVFALLSASKORNA
- D.7 BERÄKNADE MEDELVÄRDEN AV KRITISKA METALLER I FLYGASKOR FRÅN ROSTER- OCH FB-PANNOR
- D.8 BERÄKNADE MEDELVÄRDEN AV KRITISKA METALLER I BOTTENASKOR FRÅN ROSTER- OCH FB-PANNOR

### E REFERENSER SOM ANVÄNTS I BILAGA A-C.



# 1 Inledning

## 1.1 Problembeskrivning

EU-kommissionen har i en rapport från 2010 pekat ut 14 kritiska metaller och metallgrupper [1]. Dessa är sådana som bedöms som vitala för utvecklingen inom exempelvis datorer, elektronik och elbilar och där användningen väntas öka markant inom de närmaste decennierna. Dessutom är de kända tillgångarna av flera av dessa ämnen koncentrerade till enskilda länder utanför EU. 90 % av de kritiska jordartsmetallerna och antimon bryts i Kina och Brasilien står för lika stor andel av niob [2]. För tillfället sker därför inom Europa en intensiv kraftsamling kring frågor som rör dessa metaller.

Askorna från avfallsförbränningen reflekterar samhället vi lever i och i takt med att produkterna vi konsumerar blir allt mer komplicerade och svårare att återvinna, avspeglas detta också i askorna. Att askorna innehåller exempelvis tungmetaller och andra ämnen är naturligt och dessutom ett tecken på att anläggningen fungerar eftersom de är designade för att avgifta kretsloppet. Samtidigt är askorna en stor avfallsström motsvarande 20-25 % av inkommande avfallsmängder. Ur ett resursperspektiv skulle det vara önskvärt att i framtiden kunna använda denna ström som en råvaruström och erhålla något som kan nyttiggöras utanför deponier i betydligt högre utsträckning än vad som görs idag.

Askor från avfallsförbränning har under de senaste två decennierna varit ett forskningsobjekt för många. Möjlig avsättning av askor har undersökts, som t ex konstruktionsmaterial i vägar, och uppmärksamhet har riktats mot kemiskt innehåll och utlakning av miljörelevanta ämnen [3]. Viss forskning har fokuserat på återvinning av metaller som t ex Cu och Zn [4-6]. Dioxininnehållet i askorna har också utretts inom Avfall Sverige [7, 8].

Kunskapen om förekomsten av kritiska metaller i askor från avfallsförbränning är väldigt begränsad och samma sak gäller exempelvis fördelningen av ämnena mellan flyg- och bottenaska. Det finns en del värden rapporterade i litteraturen [9] men ingen större genomgång har gjorts för att täcka de kritiska metallerna i ett antal anläggningar. Innehållet i askorna kan också tänkas skilja mellan olika länder beroende på hur utvecklad källsorteringen och avskiljningen av farligt avfall är. En bättre kunskap om innehållet i askorna är också en förutsättning för att senare kunna välja behandlingsmetoder av askorna och kunna utnyttja det potentiella mervärde som kan finnas i form av dessa ämnen.

## 1.2 Syfte och mål

### 1.2.1 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka askor från avfallsförbränning som potentiell resurs av kritiska metaller/ämnen. Förekomsten i askorna ska ställas i proportion till användningen av dessa ämnen i Sverige. Med kritiska metaller och ämnen avses här 12 av de 14 metaller, ämnen och grupper identifierade av EU som kritiska [1, 10], dvs:

antimon, indium, beryllium, magnesium, kobolt, niob, gallium, germanium, tantal, volfram, samt platinagruppen (platina, palladium, iridium, rodium, rutenium och osmium) och sällsynta jordartsmetaller (yttrium, skandium och de så kallade lantaniderna; lantan, cerium, praseodymium, neodym, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium och lutetium).

I denna studie exkluderas flusspat och grafit eftersom de inte anses vara möjliga att kemiskt bestämma med rimliga insatser, samt att de inte bedöms vara intressanta för återvinning ur askor. Prometium är inte heller intressant i detta projekt eftersom den enbart förekommer i radioaktiva isotoper. Även osmium har uteslutits då den inte förväntas hittas i rapporterbara halter och kräver speciell analysutrustning.

### 1.2.2 Mål

Målen med projektet är att:

- Undersöka vilka kritiska metaller som går att bestämma i askor från svenska avfallsförbränningsanläggningar.
- Undersöka koncentrationer av de kritiska metaller i svenska askor som går att bestämma enligt föregående mål.
- Genomföra en analys av hanteringen av kritiska metaller (användningsområden, utvunna mängder med mera).
- Generalisera resultaten och relatera mängderna i avfallsaskorna till användningen av dessa metaller i Sverige.

### 1.2.3 Relevans för Waste Refinerys mål

Projektet har genererat kunskap kring innehållet av kritiska metaller i avfallsaskor. Detta är det första steget mot att kunna utvinna mer resurser ur askorna. En eventuell framtida utvinning av dessa metaller ur askan kan medföra en intäkt som därmed kan minska totalkostnaden för hantering av brännbart avfall. Som en positiv bieffekt kommer den kvarvarande askan att ha lägre koncentrationer av metaller och därmed vara lämpligare för avsättning som exempelvis konstruktionsmaterial.

Målen med projektet är i linje med Waste Refinerys mål att utveckla nytt kunnande i frågor som är viktiga för utvecklingen av ett effektivt avfallssystem både i ett nationellt och globalt perspektiv. Konkret kommer projektet att bidra till uppfyllelse av följande av Waste Refinerys delmål:

- Framtagandet av metoder som kan öka resursutnyttjandet av biprodukter såsom t ex askor, rötrest och mull.
- Utifrån ett systemperspektiv identifiera samordningsvinster som sänker kostnaderna med 20 % för avfallsbehandling.

### 1.3 Avgränsningar

Andra frågor som är av intresse för området återvinning av kritiska metaller ur askor är t ex extraktionsmetoder och optiska metoder och state-of-the-art inom dessa. Detta ingår dock inte i detta projekt.

Metallernas kemiska form i askan kan vara avgörande när man planerar deras återvinning ur askan. En fullständig undersökning av förekomstformerna är dock ett alltför omfattande arbete för att kunna inrymmas i detta projekt. Projektet kommer därmed fokusera på att bestämma totalhalterna.

## 2 Bakgrund

Under 2010 gav EU-kommissionen ut en rapport ”Critical raw materials for the EU” [1] där man identifierar ett antal metaller/ämnen som är speciellt viktiga för den ekonomiska utvecklingen i EU. Urvalet är ämnen där man ser att användningen sannolikt kommer öka kraftigt i framtiden samtidigt som de kända tillgångarna huvudsakligen är koncentrerade till ett fåtal länder utanför Europa. Många av de identifierade ämnena är sådana som används inom exempelvis ny elektronik (smarta telefoner, platta bildskärmar med mera) men de kan också vara viktiga för exempelvis vindkraft, solceller, plastproduktion och elbilarnas utveckling.

Kommissionen identifierar också ett behov av att få bättre data när det gäller livscykeln för dessa ämnen och produkterna de används i. Askor från avfallsförbränning är en potentiell källa för dessa kritiska metaller.

Listan över de kritiska metallerna kommer att förändras med tiden och det pågår för tillfället ett revideringsarbete. En preliminär lista har presenterats vid en konferens i Portugal där det tillkommer 7 element (bland annat fosfater, borater och krom) medan tantal tas bort från listan [11].

### 2.1 Askor från avfallsförbränning

Vid förbränning av olika bränslen fås en rest, aska. Denna består av olika askbildande ämnen som ingår i bränslet.

När det gäller rester från avfallsförbränningen så består de dels av den traditionella ”askan” som bildas vid förbränning av alla fasta bränslen, men också av stora mängder andra material som normalt inte är att betrakta som brännbara. Detta kan vara exempelvis metall eller andra material från sammansatta produkter som kasserats men också exempelvis söndrigt glas och porslin som slängs i restavfallet enligt sorteringsanvisningar från kommunerna. Resterna innehåller också rester från felsorterat avfall i varierande mängder, exempel på sådant kan vara metallförpackningar, bilfälgar och tegelstenar. I rapporten kommer aska att användas som samlingsnamn för dessa rester från avfallsförbränningen.

Mängden aska varierar beroende på vilken typ av avfall som eldas men normalt ligger återstoden på 20-25 % av avfallets ursprungliga vikt. Beroende på teknik varierar också fördelningen mellan bottenaska och flygaska. Fluidbäddanläggningar (fb-anläggningar) har en stor andel flygaska medan det på rosteranläggningar är bottenaskan som dominerar.

Samtidigt som energin i avfallet återvinns i form av el, värme och i vissa fall kyla, har avfallsförbränningen en annan viktig roll, nämligen att avgifta samhället. Farliga ämnen fångas upp i processen vid avfallsförbränningen. De mer flyktiga ämnena förångas/rycks med i rökgasen och fångas sedan upp i något av reningsstegen som till exempel elfilter för partiklar, aktivt kol och kalk i ett slangfilter för exempelvis kvicksilver eller så fångas de i något vått reningssteg. De mer stabila föreningarna stannar typiskt i bottenaskan. Resultatet blir oavsett teknik en anrikning jämfört med de ingående halterna i avfallet.

Askorna hanteras idag olika. En stor del av flygaskan exporteras till Norge där den nyttiggörs i samband med neutralisering av surt avfall från industrin och återfyllning av kalkbrottet på ön Langøya i Oslofjorden [12]. Bottenaskan används i huvudsak som konstruktionsmaterial på deponier. När det gäller bottenaskan har det nationellt gjorts en del arbete kring denna för att försöka få avsättning för den utanför deponier.

Askor från avfallsförbränning har varit objekt för många undersökningar, dock har fokus i dessa huvudsakligen varit på miljörelaterade frågeställningar som lakning av metaller och salter. Relativt lite kraft har lagts på att dokumentera de resurser askan innehåller som skulle kunna innebära ett mervärde vid utvinningen. Chalmers och Linköpings universitet har tittat på möjligheterna att utvinna exempelvis koppar ur flygaska [4]. I Schweiz finns det ett antal asktvättar (Fluwa) för flygaska [13] där man också får olika metallhydroxidslam som skickas till metallindustrin. En anläggning har nu tagit detta ett steg längre och installerat en elektrolysanläggning för att renframställa zink ur flygaskan, processen (Flurec), denna utvinning finns beskriven på leverantörens hemsida [14]. Det är samma leverantör som levererar asktvättarna och zinkutvinningsprocessen i Schweiz, BSH Umweltservice AG.

Ett ökat metallpris har också gjort att intresset för att förbättra avskiljningen av metallskrot (både magnetiskt och icke-magnetiskt) har ökat de senaste åren. Det finns olika varianter på detta, dels sådana som bygger på traditionell teknik på befintliga askor men också processer där man exempelvis frångår den traditionella våta utmatningen av bottenaska för att bättre kunna avskilja metallerna [15]. Värdet i framförallt de icke-magnetiska metallerna (Cu, Al, Zn samt exempelvis Au) är det som i flera fall drivit förbättringarna. Det koncept som är mest väldokumenterat är den torra utmatningen vid KEZO i Schweiz tillsammans med en pilotanläggning i Amsterdam som genererat flera vetenskapliga artiklar [16, 17]. Att intresset för resurserna i aska ökat kan också ses på det faktum att det i Köpenhamn hölls en välbesökt konferens riktad mot utsortering av aluminium i askor, hösten 2010.

Inom Waste Refinery har det genomförts några projekt kopplade till askor. Fokus har dock varit att minska driftrelaterade problem eller att minska askornas miljöpåverkan. [18-20].

### 3 Material och metoder

#### 3.1 Medverkande anläggningar

De deltagande anläggningarna representerar båda de i Sverige dominerande teknikerna för avfallsförbränning, roster och fluidbädd. Det är också en spridning geografiskt från Malmö i söder till Umeå i norr och i panneffekt från 20 till 96 MW (se Tabell 1). Bränslemixen varierar också från de olika anläggningarna, den anläggning med högst andel hushållsavfall har ca 60 % hushållsavfall i mixen och resten verksamhetsavfall medan den med minst eldar 100 % verksamhetsavfall. Tre av anläggningarna har haft en mindre inblandning av ”shredder light fraction” (SLF) och lika många har också haft en inblandning av returträ under perioden.

*Tabell 1. Kort sammanfattning av medverkande anläggningar. Uppgifterna gäller den linje som provtagits i studien. I vissa fall har provtagningen dock skett på kombinerade askströmmar från flera linjer.*

*Table 1. Short summary of the participating plants. The information given concerns the boiler/line that the samples were taken from. However in some cases samples were taken from a combined stream of ashes from more than one line. The table shows thermal power, fuel flow, combustion technology and if the plants have dry and/or wet flue gas treatment.*

Anläggningsägare	Termisk effekt (MW)	Bränsleflöde (ton/h)	Teknik	Torr (halvtorr) rening	Våt rening
Borlänge Energi	30	10,5	Rost	Ja	Nej
Borås Energi & Miljö	20	7	BFB <sup>a)</sup>	Ja	Nej
E.ON, Händelö	75	25	CFB <sup>b)</sup>	Ja	Nej
Fortum, Högdalen	91	30	CFB	Ja	Ja
Jönköping Energi	65	20	Rost	Ja	Ja
Renova	54	20-22	Rost	Ja	Ja
Sysav	150	50	Rost	Ja	Ja
Tekniska verken i Linköping	68	25	Rost	Ja	Ja
Uddevalla energi	42,2	14	Rost	Ja	Ja
Umeå Energi	55	20	Rost	Ja	Ja

<sup>a)</sup> Bubblande fluidiserad bädd

<sup>b)</sup> Cirkulerande fluidiserad bädd



### 3.2 Provtagning

De deltagande anläggningarna ansvarade för provtagningen av askorna. Målet var att ta ut sammanhörande prover under två veckor. Som grund för provtagningen användes Nordtest metod för provtagning på fasta avfall [21], dock anpassat efter vad som var praktiskt och resursmässigt möjligt att åstadkomma vid de enskilda anläggningarna. En av de anpassningar som har fått göras är att provtagningsperioden kortats från den ursprungligt tänkta 6-8 veckor till 2 veckor. Detta gjordes dels för att anläggningarna inte hade resurser att ha den längre provtagningen men också för att hinna med analyserna då alla anläggningar inte kunde påbörja provtagningen tidigt under våren. Det fanns betydande skillnader i provtagningen mellan de olika anläggningarna.

Provtagningen har också, på grund av utformningen av anläggningarna, skett på olika positioner, Tabell 2.

Tabell 2. Provtagningsposition/asktyp och provtagningsintervall för de olika anläggningarna.

Table 2. Sampling position or ash type and sampling rate at the different plants. The sampling positions have differed between the plants depending on where there was suitable access.

	Flygaska		Bottenaska	
	Provtagningspunkt/ asktyp	Frekvens (ggr/dygn)	Provtagningspunkt/asktyp	Frekvens (ggr/dygn)
<b>Renova</b>	Fallande ström elfilteraska	1	Från lastbilarna som transporterar slagg	15
<b>Sysav</b>	Pannaska/Elfilteraska	3	Delmängd från slaggproduktionen som sorterades och därefter provtoogs	Se bilaga A
<b>Uddevalla</b>	Elfilteraska i fallschakt till silo	1	Första skaktransportören efter askutmataren	1
<b>Borås</b>	Cyklonaska och NID <sup>a)</sup> -aska	2	Bottenaska	2
<b>Linköping</b>	Utmatningsskruv till bulkbil	3 dl/dygn, v14- 22	Sorterad slagg, prov tas i samband med sortering som sker kampanjvis 2 ggr/år	1
<b>E.ON</b>	Aska från NID	3 ggr/dygn under 2 veckor	Osorterad bottenaska inkl vändschaktsaska	3 ggr/dygn under en vecka
<b>Fortum</b>	ÖH-aska, tomdragsaska, filteraska (3 separata prov)	2	Bottenaska	2
<b>Umeå</b>	Fallande ström textilfilteraska	2	Sorterad slagg i slagghus	1
<b>Borlänge</b>	Aska från recirkulationsben i NID	Några	Deponin/ varje lastbillass	4
<b>Jönköping</b>	Vid utmatning till bulkbil	2-3 ggr/vecka	Bandtransportör från askutmatare	3

<sup>a)</sup> NID- är ett halvtorr reningssystem från Alstom bestående av en reaktor och ett textilfilter. I reaktorn tillsätts kalk och aktivt kol tillsammans med vatten för att få optimala reaktionsbetingelser.

Den mest omfattade askprovtagningen resursmässigt skedde vid Sysav i Malmö. Exempel på hur flygaskan togs ut på Sysav visas i Figur 1. För bottenaskprovtagningen togs större

delprover ut från råslaggen som sedan lagrades innan den skickades till slaggsorteringen. Under sorteringen togs ett antal delprover med täta intervall. Samlingsprovet neddelades sedan enligt kon och kvadreringsmetoden. För en mer utförlig beskrivning, se provtagningsinstruktionerna för Sysav i bilaga A.

I Fortum Högdalens panna 6 togs det ut 4 olika askprov. De asktyper som togs ut var:

- Bottenaska
- Överhettaraska
- Tomdragsaska
- Flygaska (Filteraska)



*Figur 1. Provuttag av flygaska hos Sysav.*

*Figure 1. Fly ash sampling at Sysav.*



*Figur 2. Bilder från provtagning av bottenaska vid Sysav. a) Delprovet av rå bottenaska som tagits ut. b) Uttag av delprov av sorterat slaggrus.*

*Figure 2. Pictures of the sampling procedure of bottom ash at Sysav. a) Bottom ash heap from the combined increments of raw bottom ash. b) Sampling of one increment of the sorted slag.*

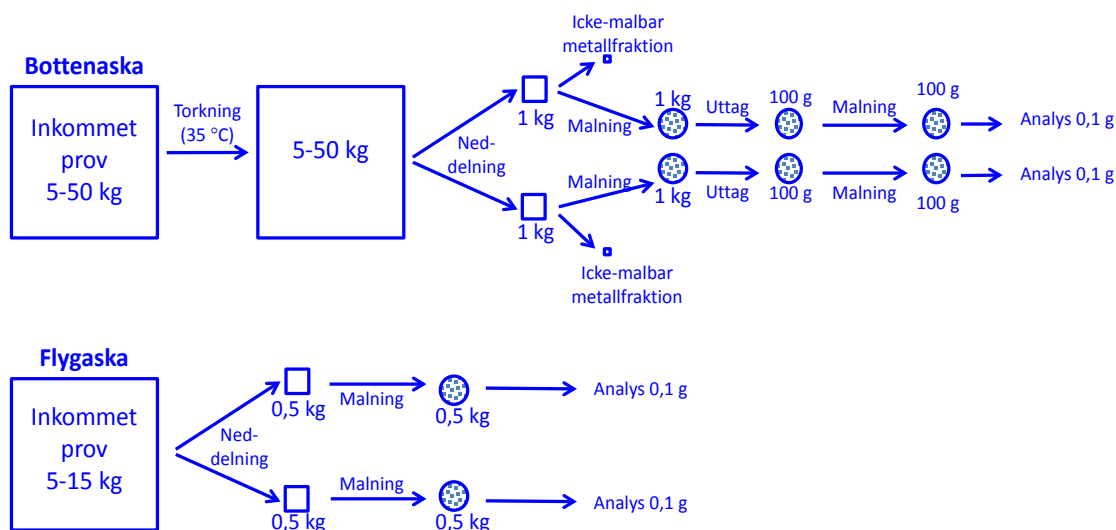


Figur 3. Provtagningsprocedur vid Sysav a) Samlingsprov efter provtagning av den sorterade slaggen. b) Neddelning av slaggruset med kon och kvadreringsmetoden.

Figure 3. Sampling of bottom ash at Sysav. a) Heap of slag gravel from the combined increments. b) Reduction of the sample size.

### 3.3 Provberedning

Hantering av prover och analys summeras i Figur 4 nedan och beskrivs ytterligare i texten nedan. I Figur 5 ges ett par exempel på hur flyg- respektive bottenaskproverna som skulle behandlas såg ut.



Figur 4. Illustration av provberedningen på laboratoriet innan analys.

Figure 4. Graphic illustration of the sample preparation before analysis. The samples were initially dried (bottom ash) and then divided into two replicates. From these replicates non crushable material have been sorted out before grinding.



*Figur 5. Exempel på askprov som inkom för analys. De övre bilderna är flygaskor medan de nedre är bottenaskor.*

*Figure 5. Examples of ash samples that were to be analysed. The upper two pictures are fly ash and the lower two bottom ash.*

### 3.3.1 Neddelning och homogenisering av askor

Neddelning och homogenisering av askorna har skett enligt följande: Bottenaskor torkas i 35 °C över natten. Från varje inkommit prov av botten- och flygaska plockas två replikat ut på 1 kg för bottenaskor respektive 0,5 kg för flygaskor genom neddelning i en spaltdelare. Från bottenaskorna plockas en icke-malbar fraktion ut från replikaten som utgörs av metallbitar som vägs och fotograferas, exempel på hur det kunde se ut visas i Figur 6. Både bottenaskor och flygaskor mals i en skivkvärl. För bottenaskan plockas sedan 100 g ut och mals (kulkvärl) varpå 0,1 g tas ut för analys. För flygaskan plockas 0,1 g ut för analys direkt från det neddelade och malda provet.





Figur 6. Exempel på bortsorterade icke-malbara fraktioner från två olika bottenaskor (vänster respektive höger bild). Varje bild illustrerar också skillnaden mellan utsorterade mängder i de två replikaten för respektive aska.

Figure 6. Examples of materials that was hand sorted and excluded from the chemical analysis. Each picture also shows the difference between how much that was removed from each of the two replicates.

### 3.3.2 Siktning av askor

Siktning av neddelad bottenaska gjordes med siktar med hålstorlek på 5,6 mm och 16 mm.

### 3.3.3 Validering

Totalt har tre certifierade referensaskor (NIST 1633b, NIST 1633c och IC-CTA-FFA -1) och två certifierade referensbergarter (NCS DC71302 som är en silikatbergart och SARM 81 som är en kromitbergart) analyserats för att validera analysmetoden.

## 3.4 Kemisk analys

### 3.4.1 Uppslutning av askor

Syrauppslutning av askorna gjordes i mikrovågsugn baserad på ”single reaction chamber”-teknologi” (UltraWAVE Single Reaction Chamber Digestion System från Milestone) med 0,1 g prov i syrablandning innehållande salpetersyra ( $\text{HNO}_3$ ), saltsyra ( $\text{HCl}$ ) och fluorvätesyra ( $\text{HF}$ ) vid 250 °C följt av tillsats av borsyra ( $\text{B(OH)}_3$ ) och ny uppvärmning till 250 °C i ett andra steg. Lösningarna späddes sedan till känd volym.

### 3.4.2 Instrumentell analys

Uppslutna prover analyserades sedan med (högupplösande) induktivt kopplad plasma-masspektrometri (ICP-MS) (Element2 från Thermo Scientific) eller med induktivt kopplad plasma-optisk emissionsspektrometri (ICP-OES) (Optima 5300 DV från Perkin Elmer) med avseende på Be, Mg, Sc, Co, Ga, Ge, Y, Nb, Ru, Rh, Pd, Ag, In, Sb, Ta, W, Ir, Pt, Au, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb och Lu. Dessutom bestämdes P, Al, Cu och Zn.

### **3.4.3 Hantering av interferenser vid ICP-MS-analys**

Möjliga interferenser har tagits från ”Interferences Workshop”, som är en del av mjukvaran till ICP-MS-instrumentet Element 2, (Thermo Scientific) och sammanställts. Baserat på denna sammanställning har man sedan valt lämpliga isotoper att bestämma, lämplig upplösning för de valda isotoperna och vilka möjliga interferenser som finns för de valda isotoperna. För de grundämnen där flera isotoper finns tillgängliga har två eller tre isotoper använts för att kontrollera att inga interferenser finns närvarande. För de grundämnen som förekommer som en enda isotop har storleken på de möjliga interferenserna bestämts och interfererande grundämnen har sedan bestämts i proverna. Dessutom har tre certifierade referensaskor analyserats (och två certifierade referensbergarter).

### **3.5 Litteraturstudie om förekomst och användning**

För informationssökningen när det gäller de kritiska metallernas förekomst och användning har söktjänsten Scopus/Scifinder använts för sökningar efter vetenskaplig litteratur och exempelvis Google för allmän informationssökning.

## 4 Litteraturstudie kritiska metaller

Med kritiska metaller och ämnen menas här de 14 metaller, ämnen och grupper identifierade av EU som kritiska [1, 10], dvs:

- Antimon, Sb
- Indium, In
- Beryllium, Be
- Magnesium, Mg
- Kobolt, Co
- Niob, Nb
- Flusspat, CaF<sub>2</sub>
- Gallium, Ga
- Germanium, Ge
- Tantal, Ta
- Grafit, C
- Wolfram, W samt
- Platinagruppen (Platina (Pt), Palladium (Pd), Iridium (Ir), Rodium (Rh), Rutenium (Ru) och Osmium, (Os))
- Sällsynta jordartsmetaller (Yttrium (Y), Skandium (Sc) och de så kallade Lantaniderna; Lantan (La), Cerium (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Prometium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Tulium (Tm), Ytterbium (Yb) och Lutetium (Lu)).

I studien har flusspat och grafit exkluderats eftersom de inte anses vara möjliga att kemiskt bestämma med rimliga insatser, samt att de inte bedöms vara intressanta för återvinning ur askor. Prometium är inte heller intressant i detta projekt eftersom den enbart förekommer i radioaktiva isotoper. Därför har de inte ingått i litteraturstudien. En detaljerad genomgång av själva återvinningsmetoderna för de enskilda metallerna ligger utanför omfattningen av detta projekt. Nya ämnen kommer sannolikt att läggas till listan över kritiska metaller och en preliminär lista har presenterats [11], men de tillkommande ämnena är inte inkluderade i litteraturstudien.

De följande avsnitten innehåller en sammanfattning av användning, förekomst, utvinning och återvinning av de kritiska metallerna samt information om ekonomisk värdering av de olika metallerna. För utförligare information finns motsvarande genomgång för de enskilda metallerna i bilaga B.

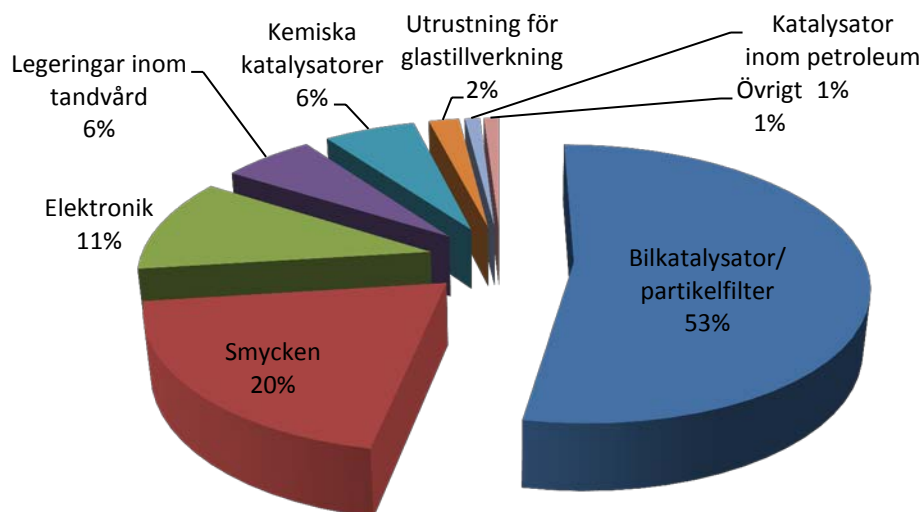
### 4.1 Användning

Vid värderingen av de ämnen som kvalificerat in som kritiska har ämnenas betydelse i viktiga produkter/branscher vägts in. Flera av användningsområdena kan vara relativt nya, exempelvis pekskärmar på telefoner och datorer men gemensamt är att ämnena bedöms som vitala för den ekonomiska utvecklingen. För många av dem bedöms också efterfrågan öka drastiskt framöver.

Ser man till användningsområdena för de kritiska metallerna så spänner de över en lång rad produkter och sektorer. Flera av de kritiska metallerna har väldigt specifika egenskaper som gör dem svåra att ersätta i vissa tillämpningar. Exempelvis så är de starkaste magneterna antingen baserade på neodym eller på kobolt, beroende på applikationerna så är de dock ofta dopade med exempelvis dysprosium, praseodym, gadolinium och terbium. Magneterna används bland annat för vindturbiner, hårddiskar, elmotorer, mikrofoner och hörlurar [1, 22]. Andra egenskaper som nyttjas för speciella applikationer är exempelvis beryllium som inte genererar gnistor vilket gör den lämplig för exempelvis borrar inom olje- och gasindustrin och i bromsar i landningsställen på flygplan.

Många av användningsområdena för de kritiska metallerna är dock i produkter som inte bör dyka upp i det brännbara avfallet i någon större omfattning. Undantag är exempelvis magnesium som är vanligt i olika förpackningar [1, 22].

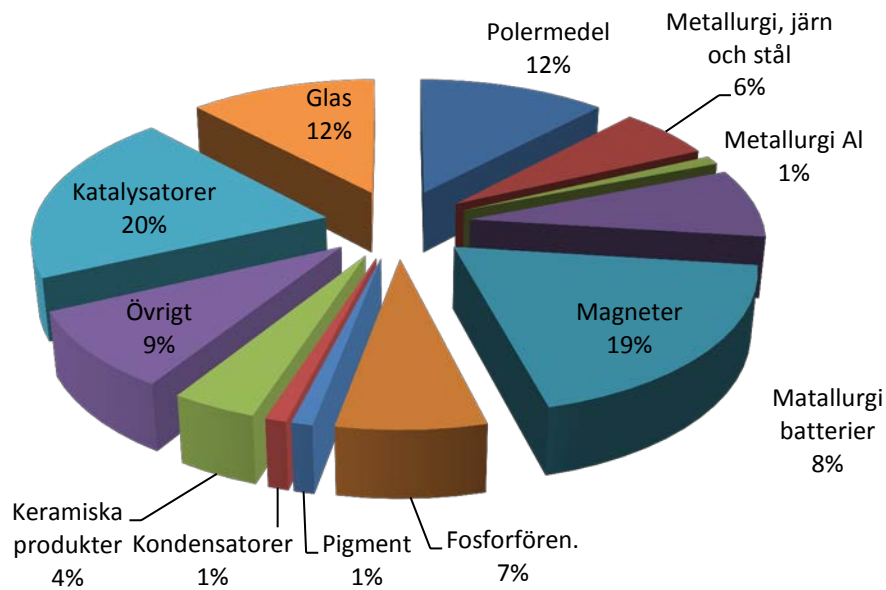
I Figur 7 och Figur 8 visas de huvudsakliga användningsområdena för platinametallerna och de sällsynta jordartsmetallerna.



Figur 7. Användningsområden för platinametallerna [1].

Figure 7. The areas of usage for the platinum metals [1].





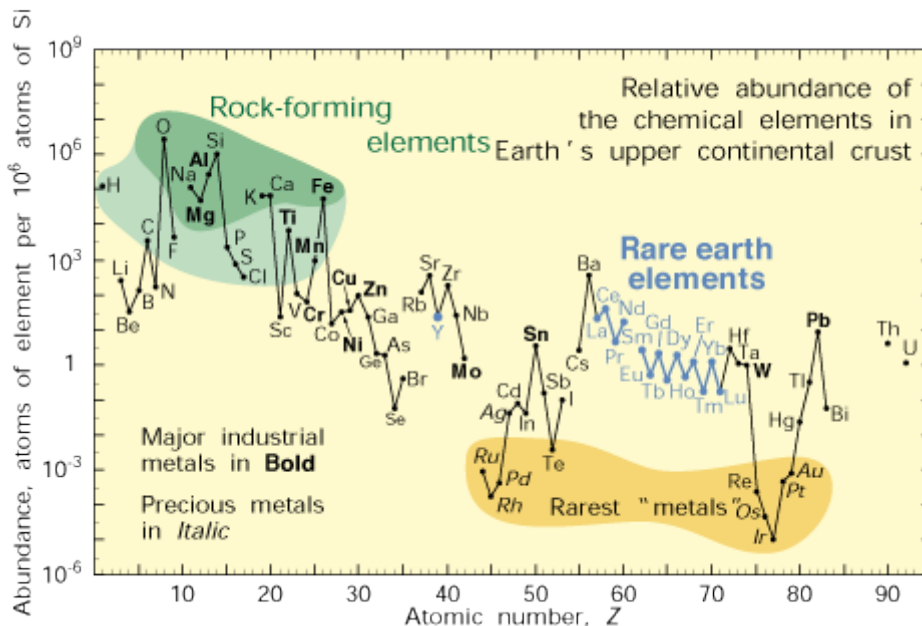
Figur 8. Användningsområden för sällsynta jordartsmetaller [1].

Figure 8. The areas of usage for the rare earth elements [1].

## 4.2 Förekomst och utvinning

Det är stor skillnad mellan hur vanliga de olika kritiska metallerna är sett till den genomsnittliga halten i jordskorpan. Figur 9 visar den genomsnittliga halten av olika grundämnen i övre jordskorpan. Några olika kategorier kan skönjas i figuren, t ex de vanligast förekommande grundämnen (mörkgrönt och ljusgrönt) som är beståndsdelar i de flesta bergarter. Sällsynta jordartsmetallerna skrivet med blå text, är lantanoiderna inklusive yttrium och lutetium. Metaller skriven med fet stil innebär betydelsefulla industriella metaller som används/bryts i stora mängder. Sällsynta metaller är skrivet med kursiv stil, och det gula fältet utgörs av de mest sällsynta metallerna, vilka är de sex platinametallerna och guld, rhenium och tellur.

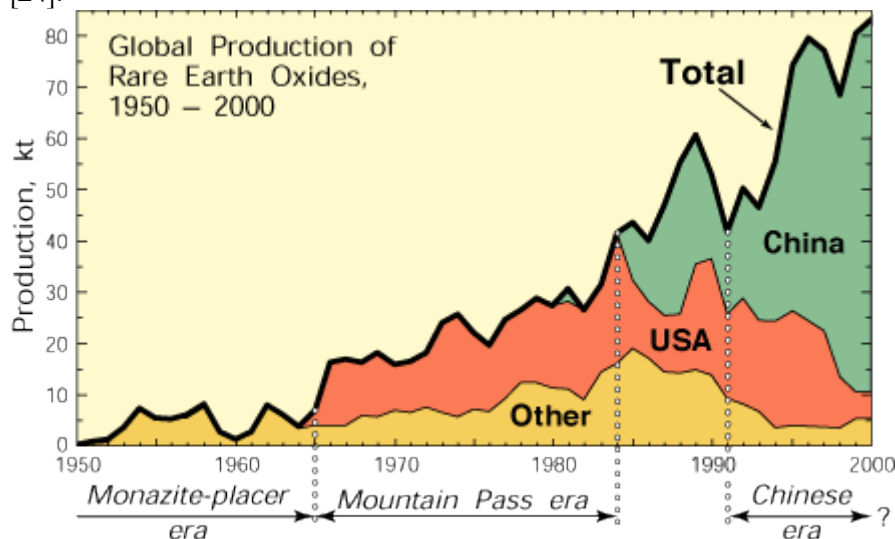
Värt att notera är att de sällsynta jordartsmetallerna inte är så ovanliga sitt namn till trots. Alla är betydligt vanligare än exempelvis guld, och en del av dem är lika vanliga som exempelvis koppar och zink.



Figur 9. Genomsnittlig halt av olika grundämnen i övre jordskorpan. Viktiga industriella metaller är markerade i fetstil medan ädelmetallerna är indikerade med kursiv stil [23].

Figure 9. Abundance of the chemical elements in Earth's upper continental crust [23].

Historiskt sett har USA varit en stor producent av sällsynta jordartsmetaller men produktionen har geografiskt förskjutits i takt med att användningen har ökat (se Figur 10). I dagsläget är det Kina som helt dominerar marknaden för sällsynta jordartsmetaller där de beräknas ha 70 % av världens reserver och 2012 stod de för 95 % av världsproduktionen [24].



Figur 10. Globala produktionen av sällsynta jordartsmetaller 1950-2000. Produktion i Kina, USA och övriga världen [23].

Figure 10. Global production of rare earth elements 1950-2000 [23].

Kina är den största producenten för en rad av de kritiska metallerna, förutom de sällsynta jordartsmetallerna är de även den största producenten av antimon (85 %), gallium, germanium (70 %), indium (58 %), magnesium (85 %) och volfram (85 %) [24].

När det gäller produktionen av de andra kritiska metallerna så framgår det i Tabell 3 vilket eller vilka land som dominerar. I tabellen framgår också den totala primärproduktionen av de kritiska metallerna. Mer detaljerad nivå för platinametallerna och de sällsynta jordartsmetallerna finns i bilaga A. Det är dock stor spännvidd mellan metallen med den lägsta produktionen (osmium, 60 kg/år [25]) och magnesium med 750 000 ton/år.

*Tabell 3. Länder som dominerar produktionen av olika kritiska metaller samt den totala primärproduktionen i världen av metallerna [24].*

*Table 3. Geographic situation of the production of the critical metals together with the yearly amount of primary production of different critical metals [24].*

	Dominerande producent	Världsproduktion (ton/år)
<b>Antimon</b>	Kina 85 %	180 000
<b>Beryllium</b>	USA 87,7 %	230
<b>Gallium</b>	Kina, Tyskland, Kazakstan, Ukraina	273
<b>Germanium</b>	Kina 70 %	128
<b>Kobolt</b>	Kongo 55 %	110 000
<b>Indium</b>	Kina 58 %, Japan, Sydkorea, Kanada 10 % var	670
<b>Magnesium</b>	Kina 85 %	750 000
<b>Niob</b>	Brasilien 91,3 %	69 000
<b>Tantal</b>	Australien 48 % Brasilien 15,5 %	765
<b>Volfram</b>	Kina 85 %	73 000
<b>Platinametallerna</b>	Sydafrika 71,6%, Ryssland 14,5 %	207
<b>Sällsynta jordartsmetaller</b>	Kina 95 %	110 000
<b>Guld</b>	Mexiko 57 %, Kanada 20 %	2 500
<b>Silver</b>	Mexiko 18 %, Kina 16 %, Peru 15 %	24 000

### 4.3 Återvinning

Återvinningsgraden för de olika kritiska metallerna ser väldigt olika ut och beror mycket på var de stora flödena finns som kan återvinnas.

Indium används exempelvis vid tillverkning av LCD-skärmar. Vid produktionen är det dock bara 15-30 % som fastnar på själva skärmen och resten blir svinn. Av svinnet uppskattas 85 % kunna återvinnas. Det återvinns även väldigt lite indium ifrån slutprodukterna [24]. Liknande situation är det för germanium där man räknar med att 60 % blir spill vid produktionen av olika optiska enheter.

Platinametallerna återvinns i hög utsträckning i de fall de ingår i industriella applikationer/tillverkningsprocesser. Däremot är återvinningen från konsumentled betydligt lägre, man beräknar att 50-60 % av platinametallerna i bilkatalysatorer återvinns. I Europa är dock den siffran åtskilligt lägre då det är vanligt förekommande med export av

gamla bilar till länder/regioner utan fungerande återvinningssystem [1]. Verkningsgraden på återvinningsprocessen är relativt hög (>95 %), vilket tyder på att det främst är ett insamlingsproblem.

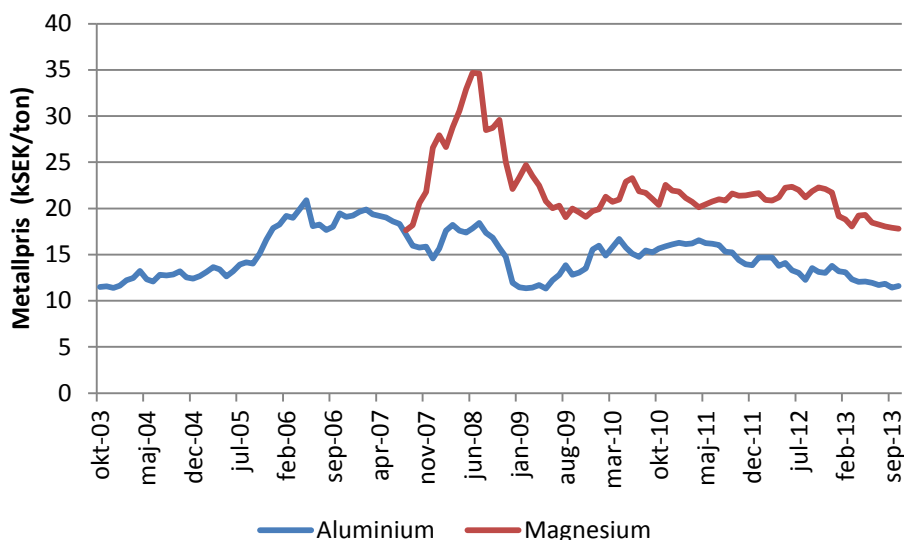
För de sällsynta jordartsmetallerna är återvinningen näst intill obefintlig. Det beräknas att 1 % återvinns och det är då i stort sett uteslutande från permanentmagneter [24].

Ofta är siffrorna kring återvinningen ganska osäkra, exempelvis har EU-kommissionen i sin rapport [1] noterat uppgifter på 3-20 % återvinning av antimon. För antimon har en stor del av återvinningen kommit från återvinning av blybatterier, denna beräknas naturligt minska i takt med att blybatterierna minskar. En del återvinning sker också passivt i form av att antimon ingår i plaster som materialåtervinns och på så sätt minskas behovet av att tillsätta ny antimon i den plastprodukten [1, 22].

#### 4.4 Metallpriser

Tillgängligheten av prisuppgifter för olika metaller varierar kraftigt. För de stora industrimetallerna går det att hitta historiska data långt tillbaka i tiden medan det är betydligt svårare att hitta för exempelvis holmium, lutetium och skandium. Data har huvudsakligen hämtats från tre webbkällor [26-28] där metalprices.com är den som har använts för de flesta metallerna. Den sidan samlar data från råvarubörser världen över, exempelvis London Metal Exchange (LME), New York Mercantile Exchange (NYMEX) och Shanghai Metal Exchange (SHME).

Metallpriserna är ofta ganska konjunkturkänsliga, de flesta stora industrimetaller följer världskonjunkturen och exempelvis när den ekonomiska krisen slog till 2008-2009 sjönk priserna kraftigt från vad som varit rekordnivåer för många metaller, se exempel i Figur 11.



Figur 11. Historiska priser för aluminium och magnesium där prisnedgången under den ekonomiska krisen 2008-2009 syns tydligt [26].

Figure 11. Historical price data for aluminium and magnesium. The data clearly indicates the heavy price decline caused by the economic crisis during 2008-2009.

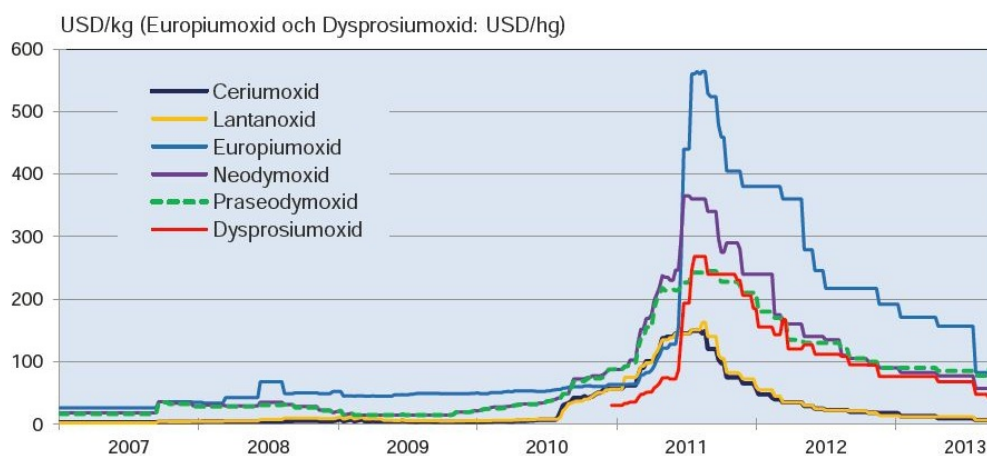
Guld har däremot varit en metall som inte visat samma tendenser som industrimetallerna. Den har setts som en säker värdeplacering och tvärtom snarare gynnsamt prismsätt när lågkonjunkturer driver investerare från aktier mot mer säkra placeringar. Utvecklingen för guld de senaste 10 åren illustreras i Figur 12.



Figur 12. Guldpriset den senaste tioårsperioden [26].

Figure 12. The price of gold over the last 10 years [26].

När det gäller de sällsynta jordartsmetallerna har det varit svårt att hitta prisstatistik för en längre tidsperiod. Den kraftigt ökade efterfrågan av en del av de sällsynta jordartsmetallerna tillsammans med risken att Kina skulle strypa exporten av metallerna drev en våldsam prisutveckling under 2010-2011.



Figur 13. Prisutveckling för några av de sällsynta jordartsmetallerna. Notera att priserna är angivna för oxider och att det för europiumoxid och dysprosiumoxid är pris per hg medan för övriga är priset per kg [29].

Figure 13. Price developments of some of the Rare earth element oxides.

Generellt kan det konstateras att det är stor spännvidd på prisnivån för de olika kritiska metallerna där de billigare, exempelvis antimon, cerium och lantan, kostar 60-70 kr/kg medan den dyraste, lutetium, kostar 2 200 000 kr/kg. En mer fullständig förteckning över priserna finns i bilaga C.

#### **4.5 Kritiska metaller i askor från avfallsförbränning**

Vid sökning i vetenskaplig litteratur efter analyser av kritiska metaller i avfallsaskor erhålls väldigt få träffar. Ser man till de sällsynta jordartsmetallerna påträffas 4 artiklar [30-33] där det finns rapporterat annat än enstaka ämnen, två av dessa artiklar är fokuserade på aska från förbränning av sjukhusavfall. De ämnen det främst finns data kring är antimon, kobolt, magnesium och silver, däremot finns det i stort sett inga resultat för platinametallerna. En sammanställning av de litteraturdata som hittats för innehåll av kritiska metaller i askor från förbränning av kommunalt avfall finns i Tabell 4. Sökningen har gjorts efter sällsynta jordartsmetaller, kritiska metaller, ädelmetaller men inte efter var och en av de enskilda metallerna eftersom det inte bedömdes som en rimlig insats i förhållande till vad det skulle ge. Det finns även några analyser publicerade på kritiska metaller i askor från anläggningar som eldar sjukhusavfall, samt på vissa andra specifika avfall som animaliskt avfall, avloppsslam och matavfall.

Även den svenska databasen Allaska [34] innehåller en del data för de kritiska metallerna i askor.

Tabell 4. Sammanställning av publicerade halter av kritiska metaller i askor från pannor som eldar kommunalt avfall. Tabellen anger medel, min, max och antal analyser som hittats.

Table 4. Summary over literature data of concentrations of critical metals in ash from MSW-incinerators. The data represent average value, minimum value, maximum value and the number of analyses found.

	Bottenaska (mg/kg)				Flygaska (mg/kg)			
	Medel	Min	Max	Antal	Medel	Min	Max	Antal
Antimon (Sb)	44	7,6	110	4	680	73	2100	14
Indium (In)	0,95	0,2	1,7	2	2,4	2,0	2,8	2
Beryllium (Be)					1,3	0,75	1,5	3
Kobolt (Co)	27	2,8	55	4	25	0,60	79	17
Gallium (Ga)	21	17	24	2	18	4,1	22	4
Germanium (Ge)	1,5	1,5	1,5	1	5,7	4,4	6,9	2
Magnesium (Mg)	8800	4100	12000	4	12000	3900	22000	11
Niob (Nb)					11	0,40	11	1
Tantal (Ta)	3,0	2,5	3,4	2	16	0,90	43	3
Volfram (W)	13	11	14	2	71	6,2	230	7
Guld (Au)								
Silver (Ag)	9,8	5,7	17	3	61	12	190	7
Palladium (Pd)	0,03	0,03	0,03	2	4,1	3,6	4,5	2
Sällsynta jordartsmetaller ( $\Sigma$ )	83	83	83	1				
Cerium (Ce)	25	25	25	1	31	30	31	2
Dysprosium (Dy)	1,3	1,3	1,3	1				
Europium (Eu)	1,5	1,5	1,5	1				
Erbium (Er)	0,74	0,74	0,74	1				
Gadolinium (Gd)	2,0	2,0	2,0	1				
Holmium (Ho)	0,24	0,24	0,24	1				
Lanthanum (La)	15	15	15	1	16	14	18	3
Lutetium (Lu)	0,13	0,13	0,13	1				
Neodym (Nd)	9,3	9,3	9,3	1	11	11	11	1
Praseodym (Pr)	2,5	2,5	2,5	1				
Samarium (Sm)	2,3	2,3	2,3	1				
Skandium (Sc)	6,5	6,5	6,5	1				
Terbium (Tb)	0,64	0,64	0,64	1				
Thulium (Tm)	0,09	0,09	0,09	1				
Ytterbium (Yb)	0,70	0,70	0,70	1				
Yttrium (Y)	16	16	16	1	16	8	21	3

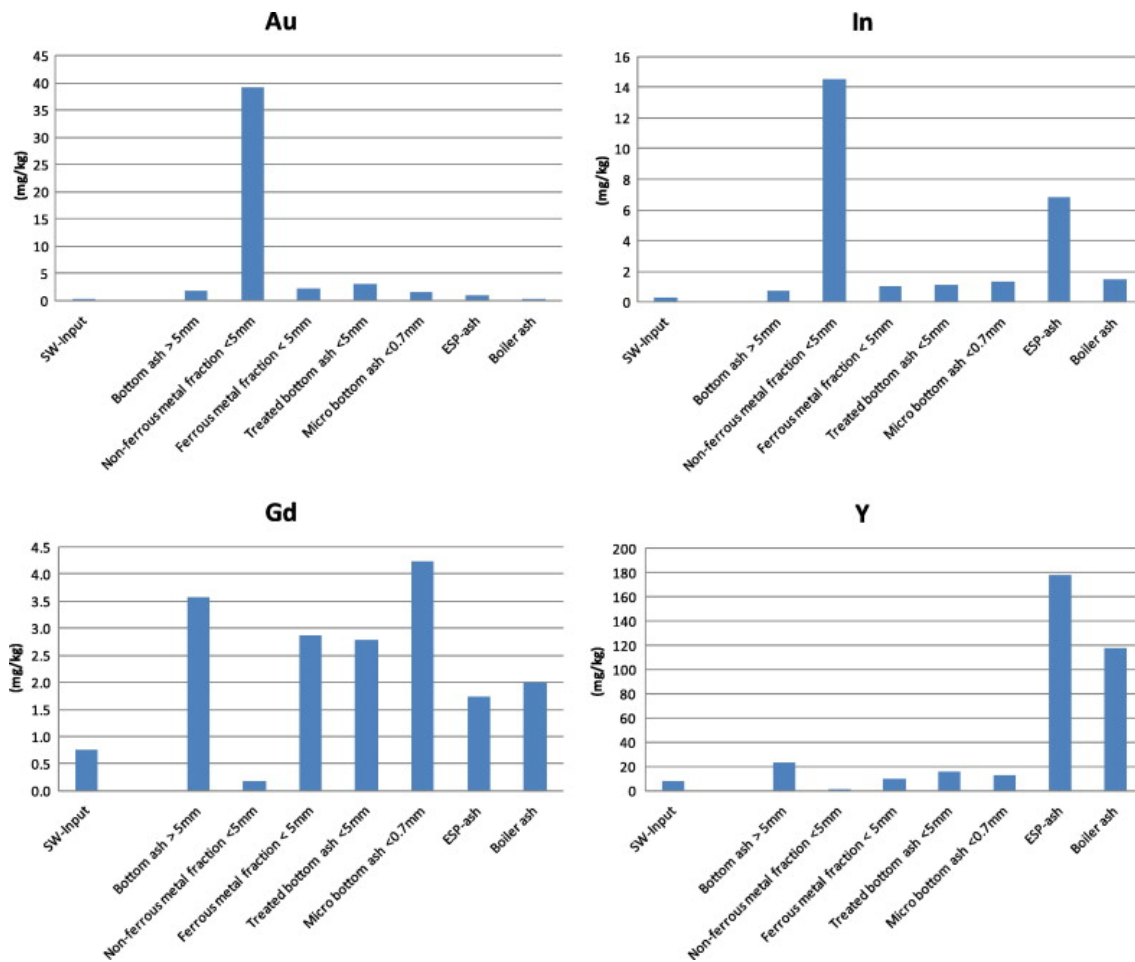
Under 2013 publicerades även en artikel avseende massbalanser för kritiska metaller i en schweizisk anläggning (KEZO) [31]. I den presenteras resultaten främst som halter i ingående avfall, se Tabell 5, men för några metaller presenteras även halterna i olika askfraktioner, se Figur 14.

Tabell 5. Koncentrationer i inkommande avfall beräknat efter halter i askströmmarna [31].

Table 5. Concentrations in incoming waste to the plant, calculated from concentrations in ash [31]. The values are given as averages together with the standard deviation. A relative standard deviation is also presented.

		Medel (mg/kg) ± standardavvikelse (mg/kg)	Relativ standardavvikelse (%)
Silver	Ag	5,30 ± 0,72	14
Guld	Au	0,40 ± 0,20	50
<b>Platinametallerna</b>			
Platina	Pt	0,059 ± 0,0220	37
Rhodium	Rh	0,000092 ± 0,000050	54
Rutenium	Ru	0,00050 ± 0,00017	33
<b>Sällsynta jordartsmetaller (REE)</b>			
Gadolinium	Gd	0,75 ± 0,17	23
Neodym	Nd	7,26 ± 3,0	41
Praseodymi	Pr	1,9 ± 0,85	44
Yttrium	Y	7,85 ± 3,5	45
<b>Andra kritiska metaller</b>			
Beryllium	Be	0,28 ± 0,031	11
Kobolt	Co	11 ± 0,8	7
Gallium	Ga	2,2 ± 0,14	6
Germanium	Ge	0,21 ± 0,014	7
Indium	In	0,29 ± 0,022	8
Niob	Nb	2,5 ± 0,10	4
Tantal	Ta	1,2 ± 0,54	43
Volfram	W	56 ± 48	85
<b>Andra metaller</b>			
Aluminium	Al	17 000 ± 960	6
Barium	Ba	749 ± 60	8
Vismut	Bi	2,8 ± 0,16	6
Koppar	Cu	2230 ± 220	10
Kadmium	Cd	8,9 ± 0,56	6
Krom	Cr	180 ± 14	8
Hafnium	Hf	2,6 ± 0,94	36
Järn	Fe	32 000 ± 1500	5
Bly	Pb	540 ± 50	9
Litium	Li	9,0 ± 0,6	6
Molybden	Mo	8,6 ± 0,9	10
Nickel	Ni	120 ± 11	9
Rubidium	Rb	8,31 ± 0,44	5
Skandium	Sc	0,96 ± 0,081	8
Selen	Se	0,45 ± 0,020	5
Strontium	Sr	130 ± 9,0	7
Tellur	Te	0,085 ± 0,011	13
Tallium	Tl	0,079 ± 0,020	26
Tenn	Sn	74 ± 7	9
Vanadin	V	11 ± 0,8	7
Zink	Zn	1600 ± 300	19
Zirkonium	Zr	116 ± 42	36





Figur 14. Koncentration i olika askfraktioner av ett urval kritiska metaller [31].

Figure 14. Concentrations, of a selection of critical metals, in different ash fractions [31].

## 5 Resultat

I resultatkapitlet återges en summering av resultaten och olika jämförelser illustreras i form av tabeller och figurer. Diskussioner och resonemang kring resultaten återfinns i kapitel 6 Resultatanalys. Tabeller med fullständiga data från analyserna återfinns i bilaga D.

### 5.1 Validering

Primärt användes certifierade referensaskor för validering av analysmetoden. För de grundämnen där referensaskor inte finns tillgängliga (Ge, Nb, Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au, Ag och Pr) har certifierade bergarter använts. Totalt har tre certifierade referensaskor (NIST 1633b, NIST 1633c och IC-CTA-FFA -1) och två certifierade referensbergarter (NCS DC71302 som är en silikatbergart och SARM 81 som är en kromitbergart) analyserats som en del i valideringen (för ett fåtal grundämnen har halterna varit informativa och inte certifierade). De kritiska grundämnena och analyserade referensmaterialen redovisas i Figur 15 nedan.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H																	2	He
2	3	4											5	6	7	8	9	10	
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	11	12											13	14	15	16	17	18	
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	
	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	
* Lantanoider	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
** Aktinoider	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Figur 15. Kritiska grundämnena och analyserade referensmaterial.

Figure 15. Critical elements and the coverage of the reference materials used.

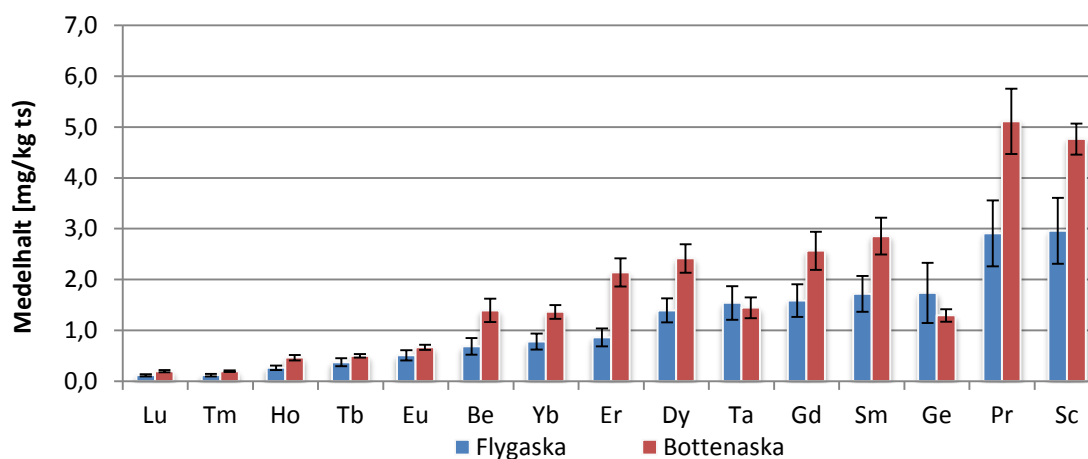
Medelvärde av relativ bias för de olika grundämnena ligger mellan 0,85-1,05 för de flesta grundämnena.

### 5.2 Resultat av de kemiska analyserna

Ett antal av de kritiska metallerna (indium och samtliga platinametaller) fanns inte närvarande i halter över rapportgränsen. För guld var de flesta analyserna under rapportgränsen, dock var något enstaka duplikat klart över detektionsgränsen, på grund av detta har inga värden redovisats för guld i de följande resultatavsnitten. För ämnen där det varit stor skillnad mellan duplikaten (främst silver och koppar) har medelvärdet fortfarande använts. För några av grundämnena bestäms rapportgränsen av närvaro av interfererande ämnen och kan därför skilja mellan olika askor. Generellt sett har ingen viktning gjorts mot mängden aska från respektive anläggning. Halter som anges är på torrt prov (torkat vid 105°C).

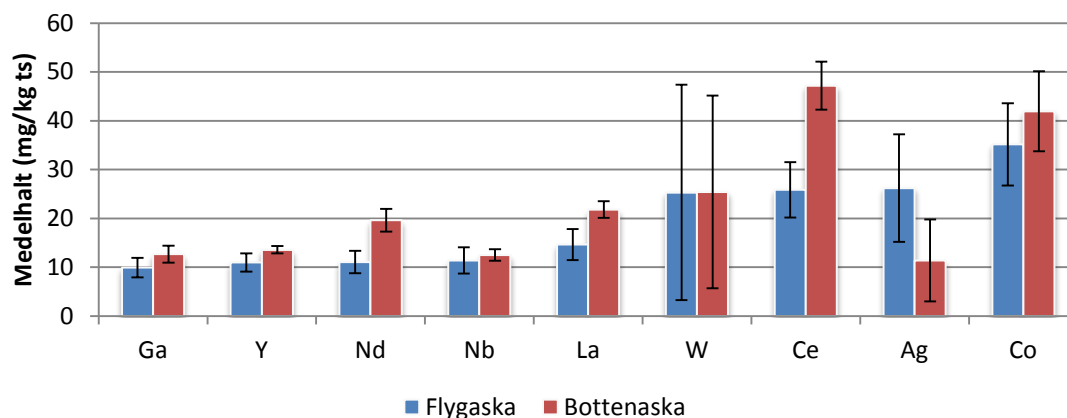
### 5.2.1 Genomsnittliga halter av de kritiska metallerna

På grund av stora koncentrationsskillnader mellan de olika elementen har resultaten delats upp i Figur 16, Figur 17 och Tabell 6. Det som redovisas är de genomsnittliga halterna av de kritiska metallerna för alla tio medverkande anläggningar. Felstaplarna indikerar 95 % konfidensintervall. Generellt kan sägas att halterna av de kritiska metallerna är högre i bottenaskorna än i flygaskorna. Undantagen är antimon, germanium, magnesium, silver och tantal där halterna är högre i flygaskorna.



Figur 16. Genomsnittliga halter av kritiska metallerna i askor från 10 svenska avfallsförbränningsanläggningar. Ämnen med halter <6 mg/kg torrsubstans (ts). Felstaplarna indikerar 95 % konfidensintervall.

Figure 16. Average concentrations of critical metals in residues from 10 Swedish waste-to-energy plants. Metals with a concentration of <6 mg/kg (dry). The error bars indicate 95 % confidence interval. Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash



Figur 17. Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från 10 svenska avfallsförbränningsanläggningar. Ämnen med halter >8 mg/kg ts. Felstaplarna indikerar 95 % konfidensintervall. Den stora spridningen för volfram beror på mycket högre halter i askorna från en anläggning.

Figure 17. Average concentrations of critical metals in residues from 10 Swedish waste-to-energy plants. Metals with a concentration of >8 mg/kg (dry). The error bars indicate 95 %

confidence interval. The large error bar on tungsten is caused by high concentrations in the residues from one specific plant. Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash

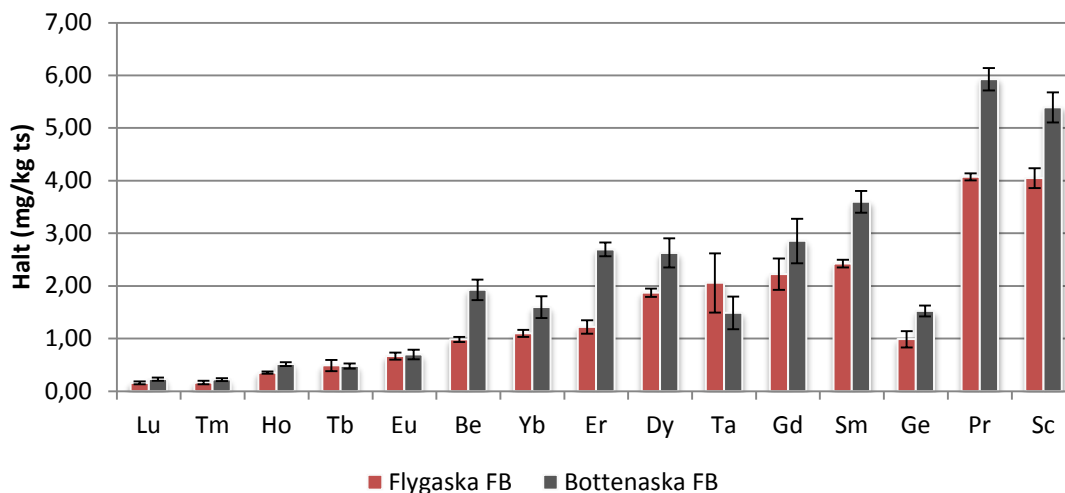
Tabell 6. Genomsnittliga halter med 95 % konfidensintervall för Sb, Mg, P, Al, Cu, Zn.

Table 6. Average concentrations of Sb, Mg, P, Al, Cu, Zn, together with the 95 % confidence interval. Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash

	Enhet	Flygaska	Bottenaska
Antimon, Sb	mg/kg ts	800±270	130±39
Magnesium, Mg	vikt% ts	0,14±0,02	0,13±0,010
Fosfor, P	vikt% ts	0,44±0,13	0,37±0,09
Aluminium, Al	vikt% ts	4,1±1,5	5,6±0,23
Koppar, Cu	vikt% ts	0,22±0,09	1,1±0,52
Zink, Zn	vikt% ts	1,7±0,65	0,37±0,05

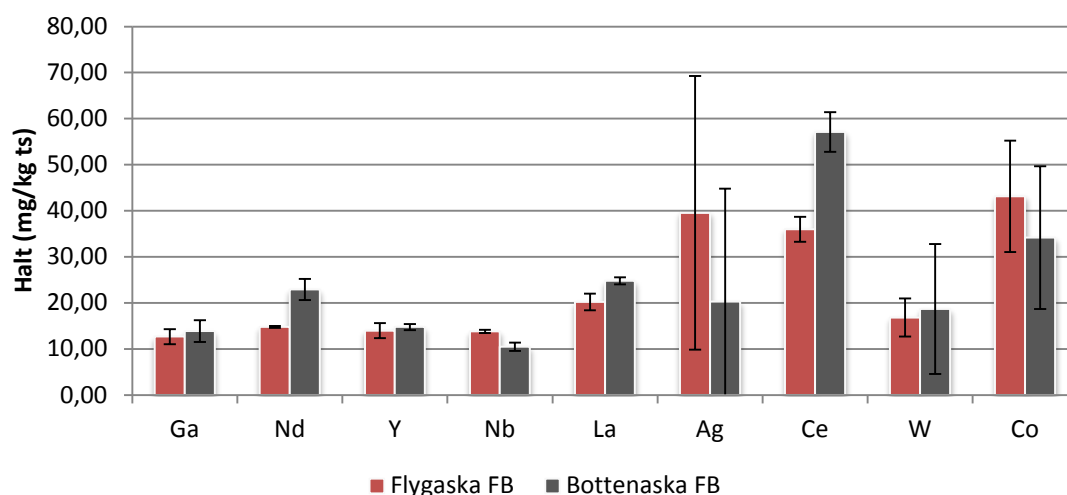
### 5.2.2 Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från fluidbäddpannor

På samma sätt som i föregående avsnitt redovisas de genomsnittliga halterna från de tre medverkande fb-pannorna i Figur 18, Figur 19 och Tabell 7. Även här har bottenaskorna generellt högre halter av de kritiska metallerna. Undantagen är antimon, kobolt, magnesium, silver och tantal.



Figur 18. Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från fb-pannor. Felstaplarna indikerar 95 % konfidensnivå. Halter <6 mg/kg ts.

Figure 18. Average concentrations of critical metals in residues from fluidized bed boilers. Error bars indicate 95 % confidence interval. Concentrations <6 mg/kg (dry). Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash



Figur 19. Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från fb-pannor. Felstaplarna indikerar 95 % konfidensnivå. Halter >10 mg/kg ts.

Figure 19. Average concentrations of critical metals in residues from fluidized bed boilers. Error bars indicate 95 % confidence interval. Concentrations >10 mg/kg (dry). Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash

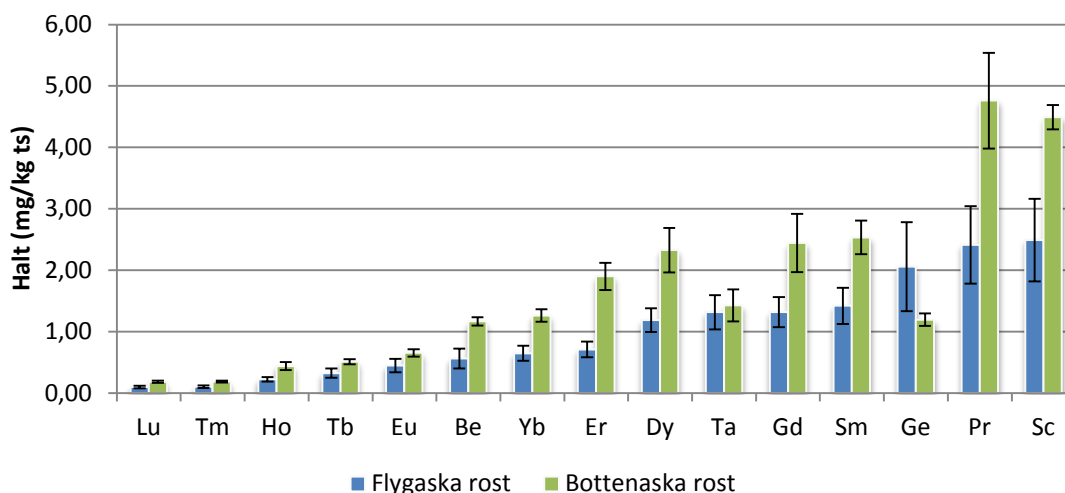
Tabell 7. Genomsnittliga halter i askor från fb-pannor med 95 % konfidensintervall för Sb, Mg, P, Al, Cu, Zn

Table 7. Average concentrations of Sb, Mg, P, Al, Cu, Zn in residues from fluidized bed boiler together with the 95 % confidence interval. Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash

	Enhet	Flygaska	Bottenaska
Antimon, Sb	mg/kg ts	320±66	210±47
Magnesium, Mg	vikt% ts	0,18±0,014	0,10±0,002
Fosfor, P	vikt% ts	0,50±0,30	0,19±0,12
Aluminium, Al	vikt% ts	7,4±0,92	5,3±0,51
Koppar, Cu	vikt% ts	0,44±0,04	0,19±0,12
Zink, Zn	vikt% ts	0,74±0,19	0,26±0,04

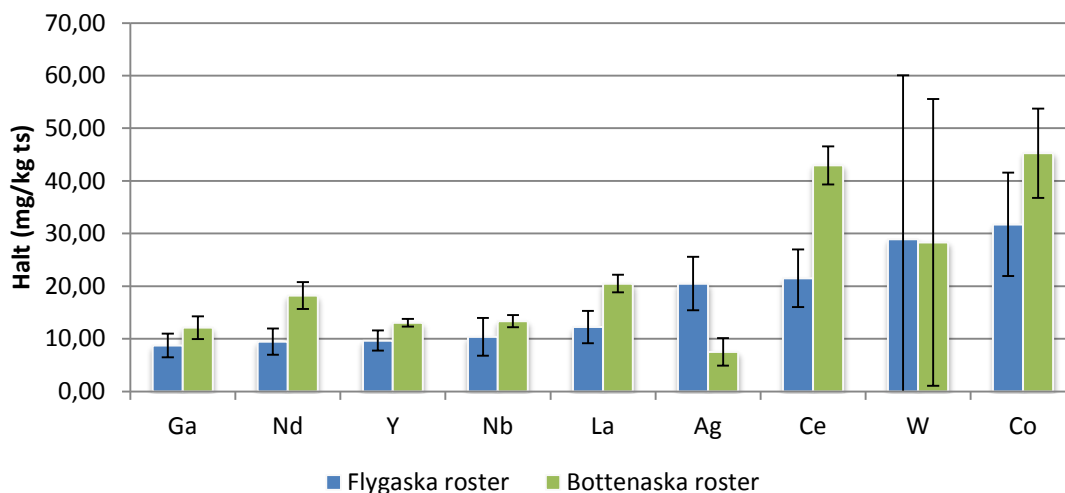
### 5.2.3 Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från rosterpannor

På samma sätt som i föregående avsnitt redovisas de genomsnittliga halterna från de sju medverkande rosterpannorna i Figur 20, Figur 21 och Tabell 8. Bottenaskorna innehåller generellt högre halter av de kritiska metallerna med undantag för antimon, silver och tantal.



Figur 20. Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från rosterpannor. Felstaplarna indikerar 95 % konfidensnivå. Halter <6 mg/kg ts.

Figure 20. Average concentrations of critical metals in residues from grate fired boilers. Error bars indicate 95 % confidence interval. Concentrations <6 mg/kg (dry). Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash



Figur 21. Genomsnittliga halter av kritiska metaller i askor från rosterpannor. Felstaplarna indikerar 95 % konfidensnivå. Halter >7 mg/kg ts. Notera att den stora spridningen för volfram främst beror på att en anläggning hade mycket höga värden.

Figure 21. Average concentrations of critical metals in residues from grate fired boilers. Error bars indicate 95 % confidence interval. Concentrations >7 mg/kg (dry). The large error bar on tungsten is caused by high concentrations in the residues from one specific plant. Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash

Tabell 8. Genomsnittliga halter i askor från rosterpannor med 95 % konfidensintervall för Sb, Mg, P, Al, Cu, Zn.

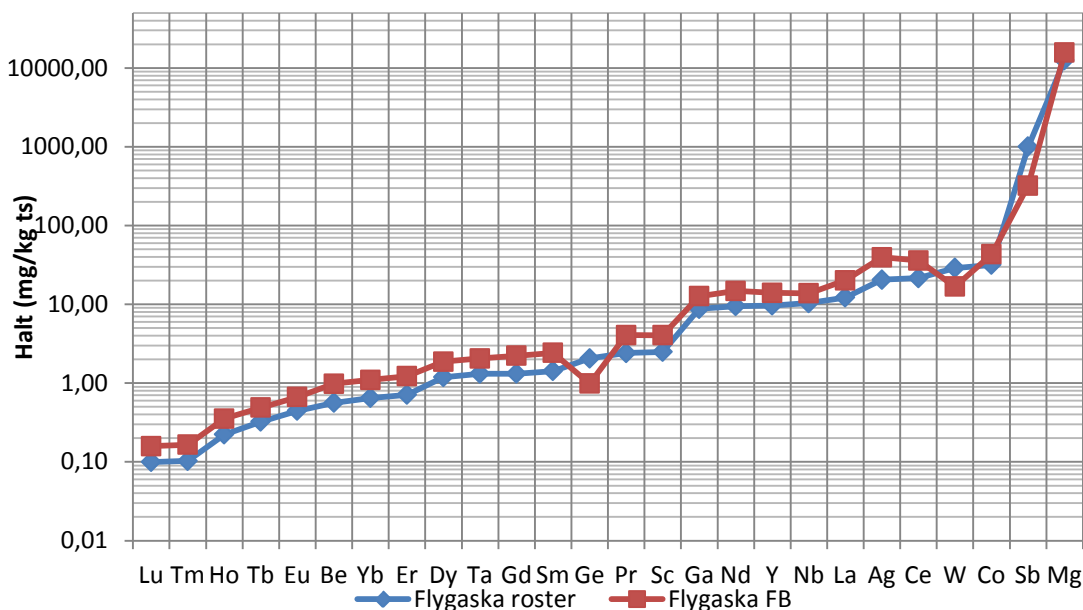
Table 8. Average concentrations of Sb, Mg, P, Al, Cu, Zn in residues from grate fired boilers, together with the 95 % confidence interval. Flygaska= Fly ash, Bottenaska = Bottom ash

	Enhet	Flygaska	Bottenaska
Antimon, Sb	mg/kg ts	1 000±260	99±28
Magnesium, Mg	vikt% ts	0,13±0,02	0,14 000±0,006
Fosfor, P	vikt% ts	0,42±0,13	0,44±0,07
Aluminium, Al	vikt% ts	2,7±0,86	5,7±0,16
Koppar, Cu	vikt% ts	0,13±0,03	1,3±0,66
Zink, Zn	vikt% ts	2,1±0,76	0,41±0,03

### 5.2.4 Jämförelse av halterna mellan fb-pannor och rosterpannor

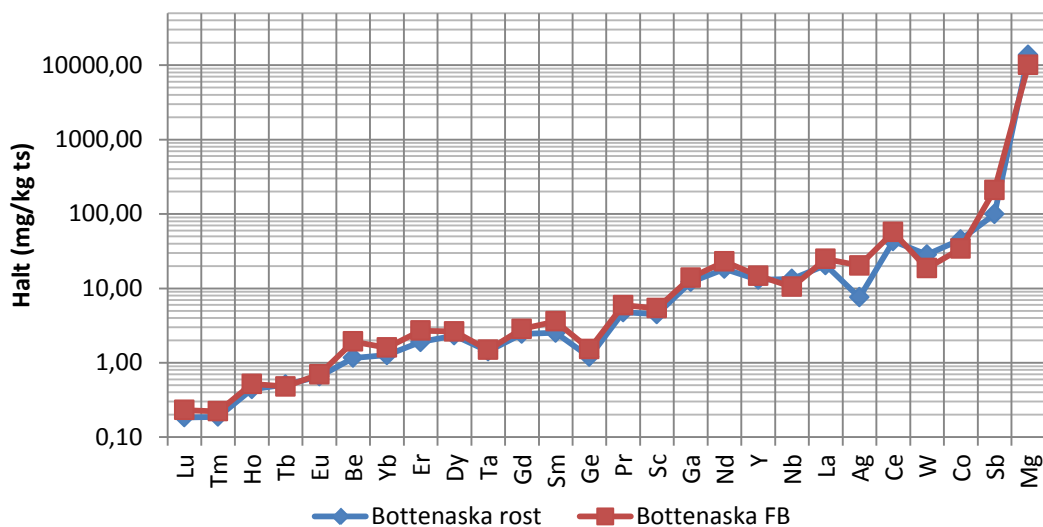
I Figur 22 och Figur 23 jämförs de genomsnittliga halterna i flyg- respektive bottenaska mellan fb- och rosterpannor. För flygaskan finns en klar tendens att halterna från fb-pannorna är högre än i rosterpannorna. Undantagen är antimon, germanium och volfram.

För bottenaskan kan man se samma trend men skillnaderna är dock betydligt mindre.



Figur 22. Jämförelse mellan halterna av kritiska metaller i flygaska från roster- respektive fb-pannor. Observera att det är logaritmisk skala för att kunna täcka in hela koncentrationsintervallet.

Figure 22. Comparison of the concentrations of critical metals in fly ash from grate fired boilers and fluidized bed boilers. Please note the logarithmic scale. The red line represent fluidized bed boiler.



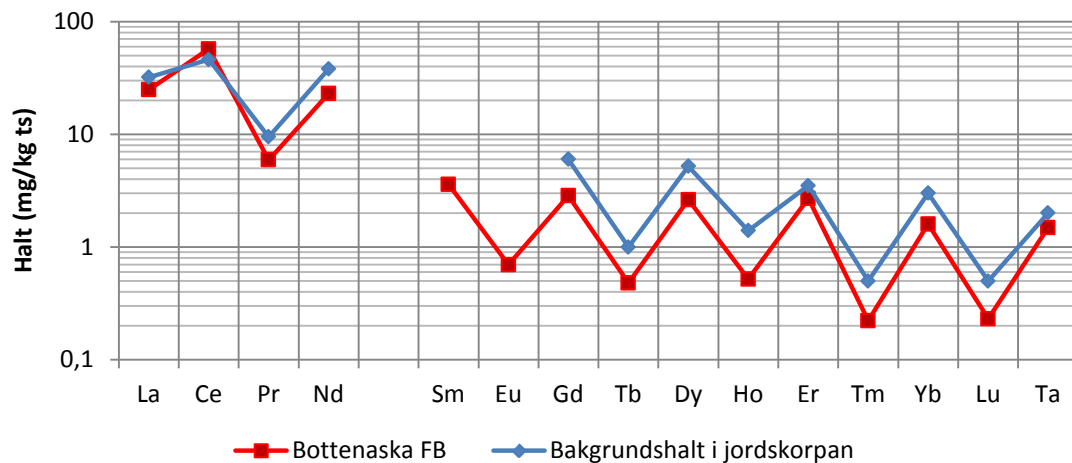
Figur 23. Jämförelse mellan halterna av kritiska metaller i bottenaska från roster- respektive fb-pannor. Observera att det är logaritmisk skala för att kunna täcka in hela koncentrationsintervallet.

Figure 23. Comparison of the concentrations of critical metals in bottom ash from grate fired boilers and fluidized bed boilers. Please note the logarithmic scale. The red line represent fluidized bed boiler.

### 5.2.5 Jämförelse av halterna i askorna mot bakgrundshalter i jordskorpan

I tidigare avsnitt fanns en figur som redovisade genomsnittliga halter i övre jordskorpan (Figur 9). Om man jämför exempelvis de uppmätta halterna av lantanoider i askorna mot den naturliga förekomsten i jordskorpan ser man att det generellt är lägre halter (se Figur 24). Detta gäller även till exempel magnesium som har en naturlig genomsnittshalt av 2,3 vikt% och genomsnittshalterna i askorna varierar mellan 1,0-1,8 vikt%.



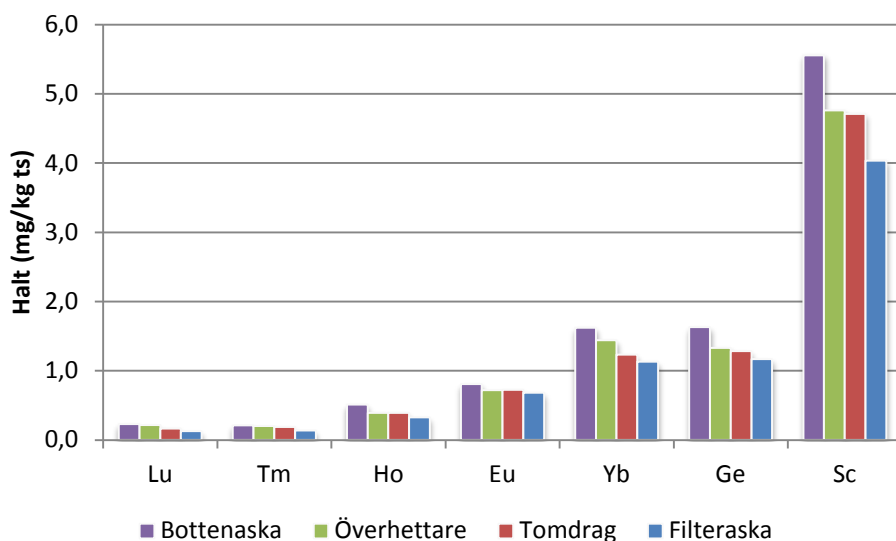


Figur 24. En jämförelse mellan askhalterna och bakgrundshalten i jordskorpan för några av lantanoiderna. The red line represent ash while the other represent the background level.

*Figure 24. A comparison of concentrations of lanthanoids in the bottom ash from fb-boilers and the abundance in the upper continental crust.*

### 5.2.6 Halter av kritiska metaller i olika askfraktioner i en FB-panna

Vid en massbalansbestämning utförd av Fortum konstaterades att bottenaskan utgjorde 45 % av askmängden, flygaskan 49 % och tomdragsaskan resterande 6 %. Överhettaraskan anses utgöra en försumbar mängd i sammanhanget. Flertalet av de kritiska metallerna är relativt jämt fördelade i de olika askorna, det finns dock ett antal som visar en trend att koncentrationen faller genom pannan (dvs. högst halt i bottenaskan och lägst i filteraskan) dessa visas i Figur 25. Noteras bör dock att det bara är baserat på en provtagning och för många är skillnaden väldigt små. Det finns även enstaka exempel som har den motsatta trenden, det är aluminium, magnesium, fosfor och zink.



Figur 25. De kritiska metaller som uppvisade en trend att ha minskande halt genom pannan. Observera att det dock för de flesta är väldigt små skillnader och resultatet enbart är baserat på ett prov.

Figure 25. An overview of those critical metals that seem to have the highest concentration in the bottom ash and then falling concentrations all the way through to the filter ash. Please note that the differences in most cases are very small and it's all based on just one sample. From left to right the different samples are bottom ash, super-heater ash, boiler ash, and filter ash.

### 5.2.7 Kritiska metaller i olika storleksfraktioner

För att få en indikation om hur de kritiska metallerna fördelar sig mellan olika storleksfraktioner i bottenaskan gjordes en storleksuppdelning av bottenaskan från Renova (rosterpanna). De fraktioner som siktades ut och mängden av respektive fraktion framgår av Tabell 9. En bild över de olika fraktionerna ses också i Figur 26.

Tabell 9. Storleksfördelningen på Renovas bottenaska samt hur mycket icke-malbara metaller som avlägsnades från respektive fraktion.

Table 9. The bottom ash size distribution (sample from Renova). The table also show how much metals that were hand sorted before the chemical analysis.

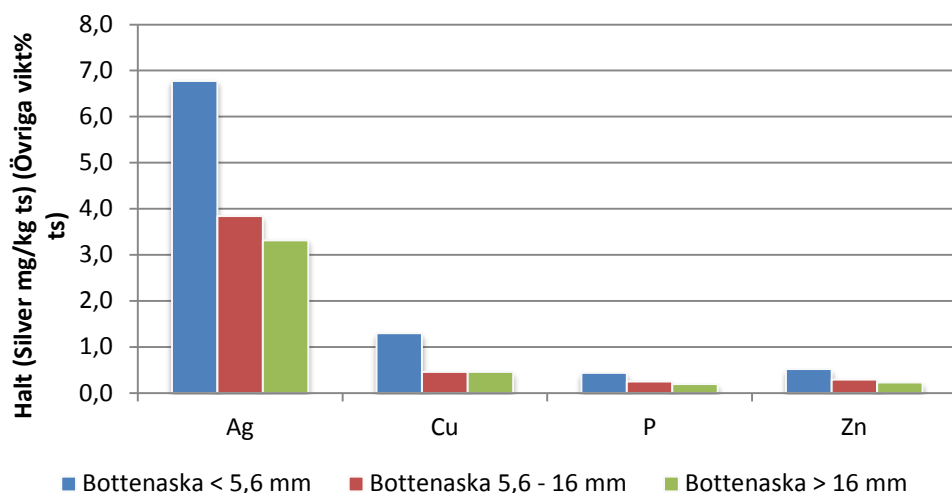
Fraktion	Andel (vikt%)	Andel icke-malbar metallfraktion i replikat som plockades bort innan malning (vikt%)
< 5,6 mm	54	1,9 och 1,3
5,6-16 mm	35	14 och 8,1
> 16 mm	11	18 och 12



Figur 26. De olika siktfractionerna på Renovas bottenaska.

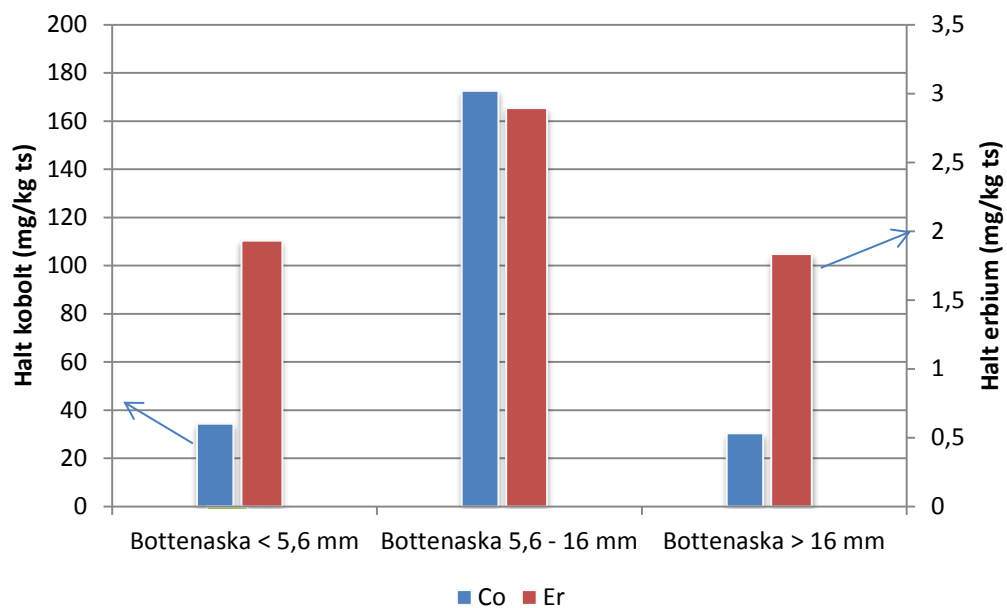
Figure 26. The different size fractions of bottom ash from Renova.

Av de kritiska metallerna var det endast silver och kobolt som inte var jämnt fördelade mellan de olika storleksfraktionerna. Silver tillsammans med koppar, fosfor och zink hade högst halt i de finare fraktionerna, se Figur 27. Kobolt däremot var den enda metallen där det var en fraktion som hade en mycket högre halt än de andra, i detta fall var det 5,6–16 mm fraktionen (se Figur 28).



Figur 27. Ett antal metaller där det fanns en tendens till fallande koncentration i större fraktioner.

Figure 27. A number of metals where there seemed to be a trend of decreasing concentrations in larger sized fractions of bottom ash.

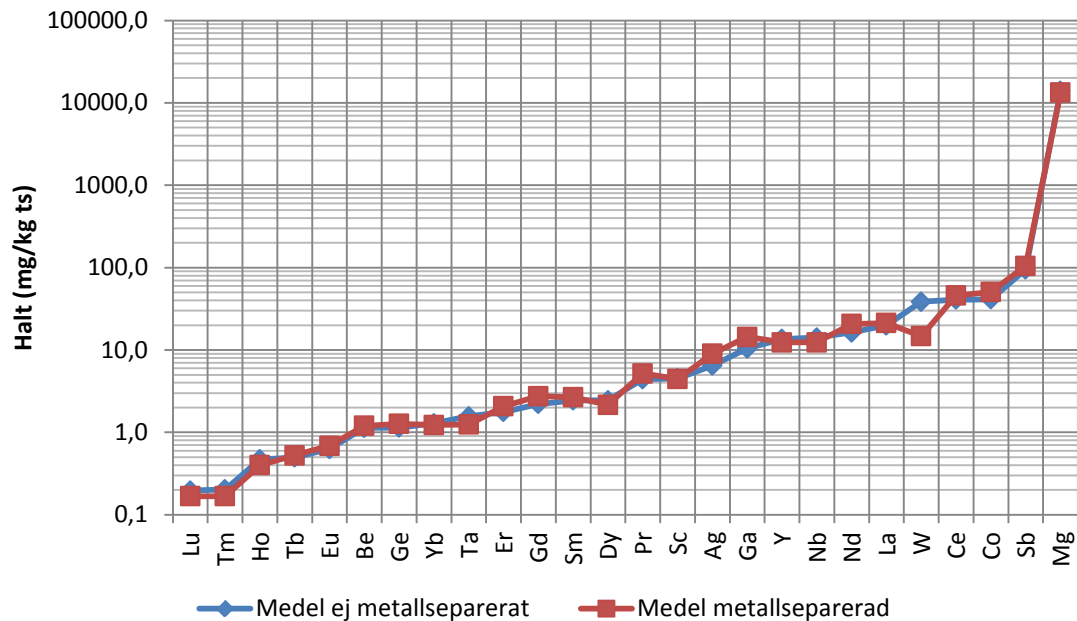


Figur 28. Halten kobolt och erbium i de olika storleksfraktionerna av Renovas bottenaska.

Figure 28. The concentration of cobalt and erbium in the different bottom ash fractions from Renova.

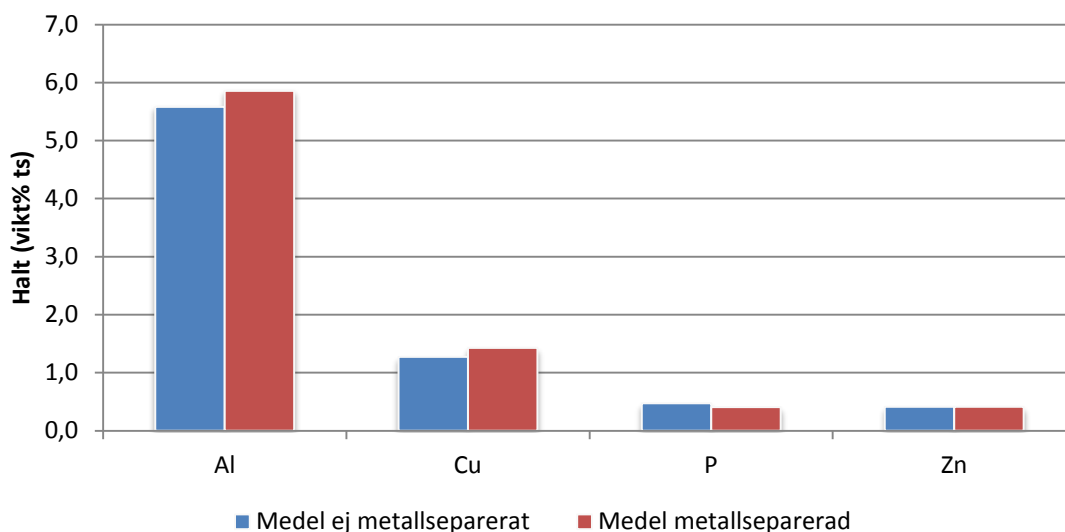
### 5.2.8 Jämförelse mellan metallavskild bottenaska och "rå" bottenaska

I undersökningen har det för rosterpannor ingått tre bottenaskor som har genomgått metallseparering och fyra som inte genomgått metallseparering innan provtagning. Det kan inte ses någon tydlig skillnad mellan de båda vare sig när det gäller de kritiska metallerna eller när det gäller aluminium, fosfor, koppar och zink. Noteras bör att ur båda typerna av askor har metaller handsorterats ut innan den kemiska analysen. Detta på grund av att kvarnen inte klarar att mala dem.



Figur 29. Jämförelse mellan halterna av de kritiska metallerna i bottenaskor som genomgått metallseparation innan provtagning och de som inte gjort det. Notera att det från båda asktyperna också har handplockats bort metaller innan analys.

Figure 29. Comparison between the concentrations of critical metals in bottom ash that has been metal separated before sampling and "raw" bottom ash. Please note that from both types there have been metals removed by hand sorting before the analysis. The red line shows the average of ashes that had passed a metal sorting facility before sampling while the other represent raw bottom ash.



Figur 30. Jämförelse mellan halterna av Al, Cu, P och Zn i bottenaskor som genomgått metallseparation innan provtagning och de som inte gjort det. Notera att det från båda asktyperna också har handplockats bort metaller innan analys.

Figure 30. Comparison between the concentrations of Al, Cu, P, and Zn in bottom ash that has been metal separated before sampling and "raw" bottom ash. Please note that from both types there have been metals removed by hand sorting before the analysis. The red bars shows the average of ashes that had passed a metal sorting facility before sampling while the others represent raw bottom ash.

### 5.3 Generalisering av resultaten till nationell nivå

Askmängder från svenska avfallsförbränningsanläggningar har erhållits från Avfall Sverige som varje år samlar in data för sina medlemsanläggningar. Data omfattar såväl våta vikter aska som produceras som fukthalt. Det är dock få anläggningar som rapporterar in fukthalt och därför har följande fukthalter antagits vid generaliseringen:

- Bottenaska roster 20 % fukthalt
- Bottenaska fluidbädd 1 % fukthalt
- Flygaska 10 % fukthalt

De angivna fukthalterna används för att räkna om de fuktiga askmängderna enligt Tabell 10.

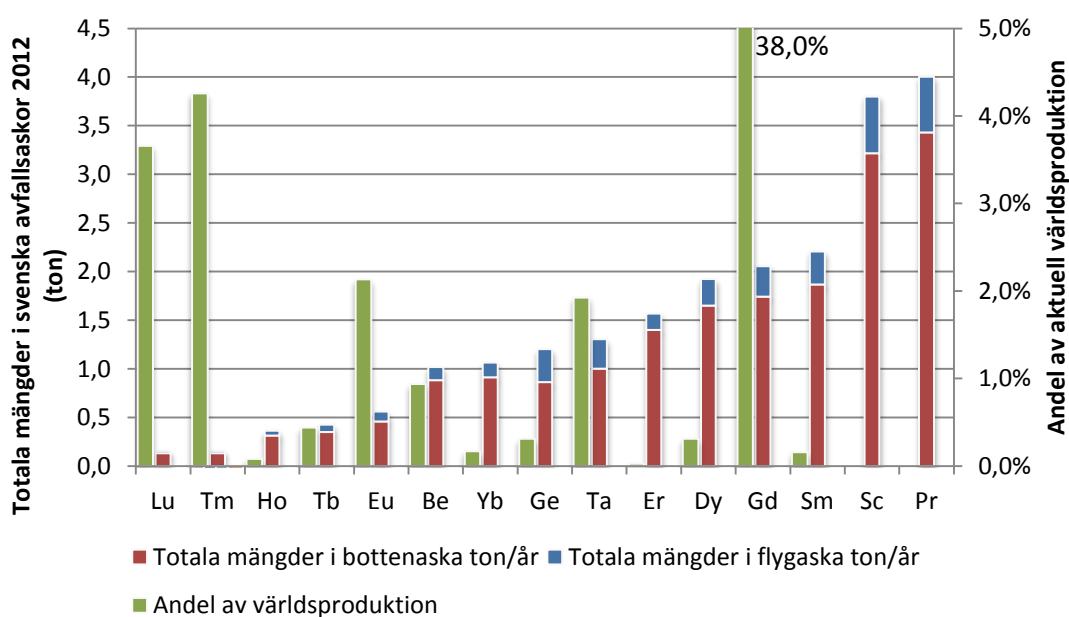
Fördelningen av aska mellan roster- och fb-pannor är inte helt klar då några anläggningar har både roster- och fb-pannor och då rapporterar in den totala askmängden från dessa anläggningar. Eftersom det fanns vissa skillnader i koncentrationer när askorna mellan roster- och fb-pannorna jämfördes (se avsnitt 0) har en uppdelning av mängderna gjorts. Uppdelningen har gjorts utifrån de kunskaper författarna har om teknik och kapacitet på de svenska avfallsförbränningsanläggningarna.

De totala årsmängderna av kritiska metaller i askor från svenska avfallsförbränningsanläggningar redovisas i Figur 31, Figur 32 och Tabell 11.

Tabell 10. Askmängder från svenska avfallsförbränningsanläggningar.

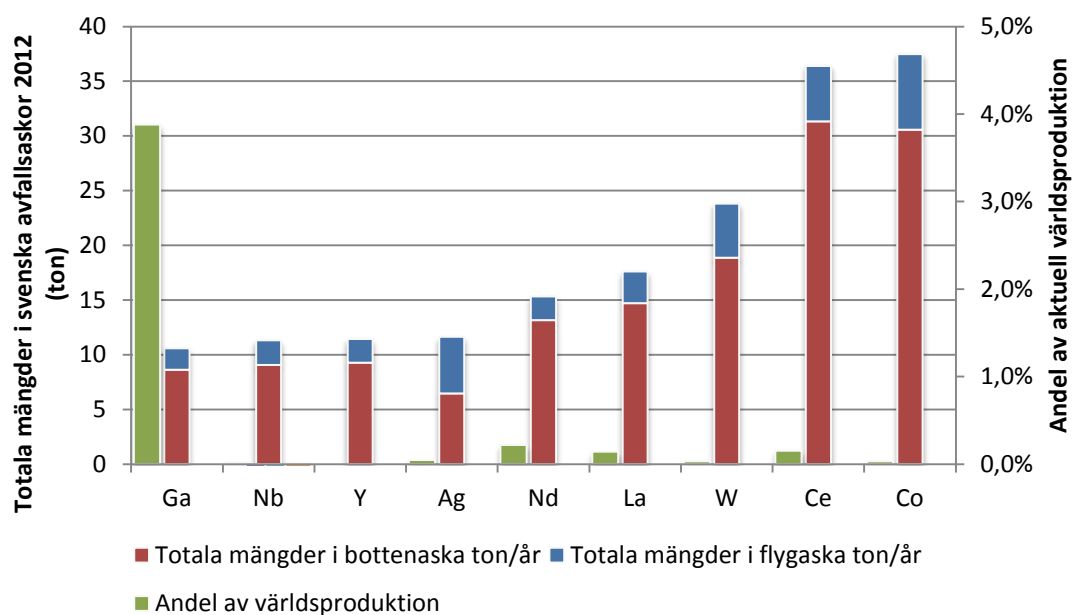
Table 10. Generated amounts of residues from Swedish waste-to-energy plants. (wet and dry weight)

Asktyp	Enhet	Våtvikt	Torrsvikt
Flygaska roster	ton/år	149 900	134 900
Bottenaska roster	ton/år	755 500	604 400
Flygaska fb-pannor	ton/år	67 500	60 700
Bottenaska fb-pannor	ton/år	94 600	93 700



Figur 31. Mängder av olika kritiska metaller i svenska askor 2012 där den totala mängden är <4 ton. Figuren visar även hur stor andel av den årliga världsproduktionen detta motsvarar.

Figure 31. The amount of different critical metals in residues from Swedish waste-to-energy plants where the total amount is <4 tons/year. The figure (green bar) also indicates how large part of the world production the different amount constitutes.



Figur 32. Mängder av olika kritiska metaller i svenska askor 2012 där den totala mängden är >10 ton. Figuren visar även hur stor andel av den årliga världsproduktionen detta motsvarar.

Figure 32 The amount of different critical metals in residues from Swedish waste-to-energy plants where the total amount is >10 tons/year. The figure (green bars) also indicates how large part of the world production the different amounts constitutes.

Tabell 11. Total mängd antimon och magnesium i svenska avfallsaskor 2012.

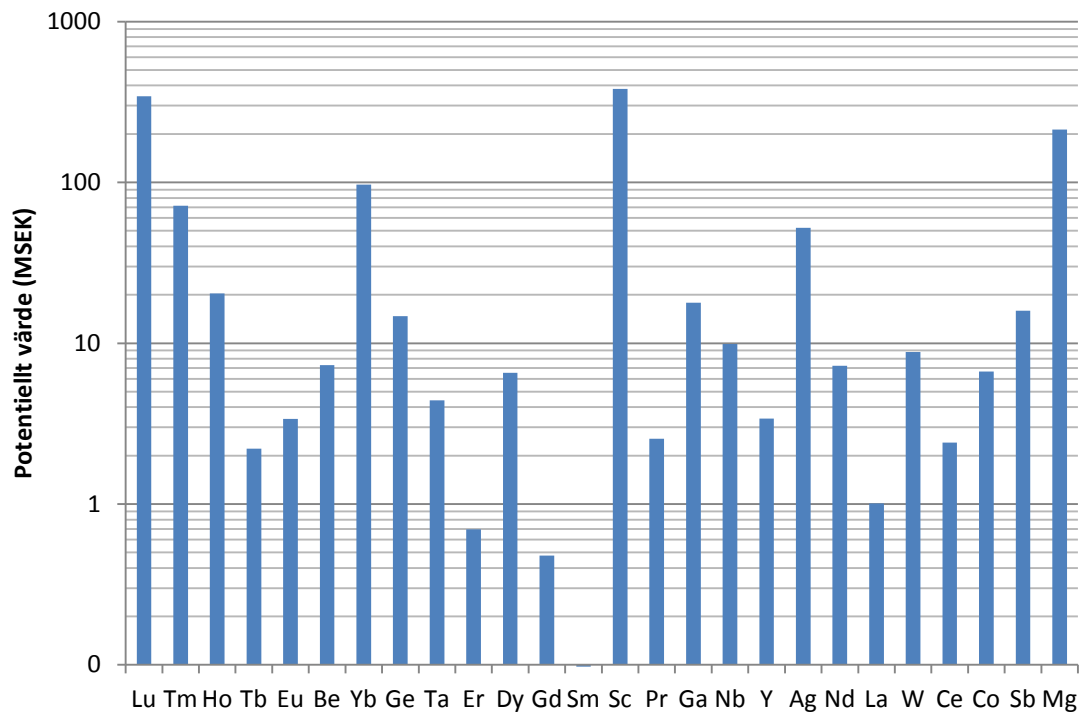
Table 11. Total amount of antimony and magnesium in residues from Swedish waste-to-energy plants in 2012.

		Sb	Mg
Totala mängder i flygaska	ton/år	155	2655
Totala mängder i bottenaska	ton/år	80	9216
Totala mängder i aska	ton/år	235	11871
Mängd som bryts i världen	ton/år	180 000	750 000
Andel av världsproduktionen		0,13 %	1,58 %



## 5.4 Ekonomisk potential

Den ekonomiska potentialen är framtagen som en indikation om vilka metaller som motsvarar högst ekonomiskt värde i slutanvändarledet. Det har inte tagits någon hänsyn till kostnaderna för återvinningen utan ska ses som ett verktyg för att kunna utröna vilka metaller som är mest intressanta om en utveckling av återvinningsmetoder för metaller ur aska skulle ske.



Figur 33. Potentiellt värde av de kritiska metallerna i svenska avfallsaskor 2012. Observera den logaritmiska skalan. Metallerna är ordnade i stigande ordning relaterat till de totala mängderna av dem i askorna.

Figure 33. Potential economic value of the critical metals in residues from Swedish waste-to-energy plants in 2012. Please observe that the y-axis is logarithmic. The metals are placed in the rising order of magnitude they exist in the residues (tons).

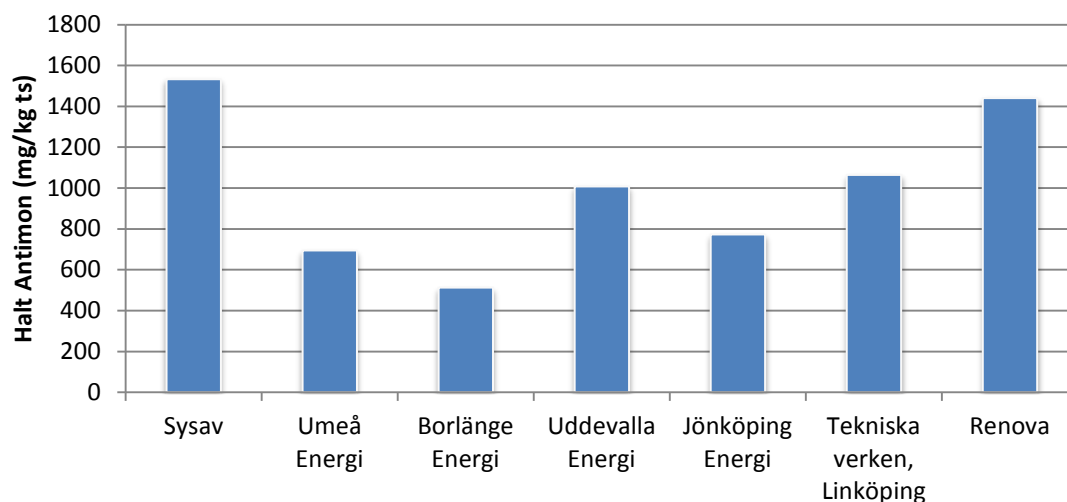
Figur 33 visar potentialen av de olika metallerna i de svenska askorna. Totalt motsvarar dessa ca 1 300 miljoner SEK. Att lägga därtill är det ca 1 060 miljoner SEK i form av aluminium, koppar och zink. Om man jämför potentialen på de sistnämnda metallerna med ett medelpris de senaste 2 åren istället för spotpriset från mitten av oktober skulle potentialen i stället vara 1 170 miljoner SEK. Motsvarande jämförelse för de kritiska metallerna går inte att göra då det för många av dem enbart hittats ett spotpris.

## 6 Resultatanalys

### 6.1 Innehållet av kritiska metaller i askor

Som resultaten i 5.2.1-5.2.5 visar, är halterna av de flesta av de kritiska metallerna låga i askorna. Även de som kanske kan tyckas vara höga (magnesium) ligger under den normala genomsnittliga halten i jordskorpan. Eftersom ingen av exempelvis lantanoiderna sticker i väg i högre halter utan följer den naturliga förekomsten väl (se Figur 24) så tyder det också på att insamlingen av exempelvis elektronikavfall fungerar relativt väl. I annat fall borde vissa av de sällsynta jordartsmetallerna avvika från mönstret i bakgrundsvärdena. Den enda av de sällsynta jordartsmetallerna som stack ut något var cerium där halten faktiskt var högre än bakgrundshalten.

Antimon är dock en av de kritiska metaller som visar upp klart högre halter i askorna än vad som är den genomsnittliga halten i jordskorpan (1 mg/kg). Det gäller i samtliga askor men speciellt flygaskan från rosteranläggningar (se Figur 34). Antimon används mycket i exempelvis flamskyddsmedel. Varför vissa av anläggningarna har klart mycket högre antimonhalter än de andra är dock osäkert, en hypotes är att de kan ha en större andel plast och textilier innehållande flamskyddsmedel i avfallet de har eldat.



Figur 34. Halter av antimon i flygaska från sju svenska rosteranläggningar.

Figure 34. Concentrations of antimony in fly ash from seven Swedish waste-to-energy plants.

Ytterligare metaller som har högre halter än bakgrunden är kobolt, silver, tantal och volfram. När det gäller silver är halterna dock klart lägre än vad exempelvis Sotkamo har indikerat i sin prospektering av ny silvergruva i Finland. Där talar de om halter om ca 125 mg/kg [35] jämfört med medelvärdet i flygaskorna som var 26 mg/kg. Dock fanns det i flygaskan från en anläggning silverhalter på 70 mg/kg.

Generellt är halterna i de svenska askorna också betydligt lägre än de som presenteras i den schweiziska studien. Hur mycket av skillnaden som kan förklaras av att de i sin bestämning även analyserade större metallföremål, medan dessa plockats bort i denna studie, är osäkert.

### 6.1.1 Analysmetod

Analys av askor kan göras med flera olika tekniker t.ex. induktivt kopplad plasma-masspektrometri (ICP-MS) eller induktivt kopplad plasma-optisk emissionsspektrometri (ICP-OES) (efter mikrovågsuppslutning av provet i syra eller provupparbetning via smälta som sedan löses i syra), röntgenfluorescens (XRF) och neutronaktiveringsanalys (NAA).

De olika analysteknikerna har olika för- och nackdelar för olika grundämnen och provtyper, och en längre diskussion kring detta ligger utanför omfattningen av projektet.

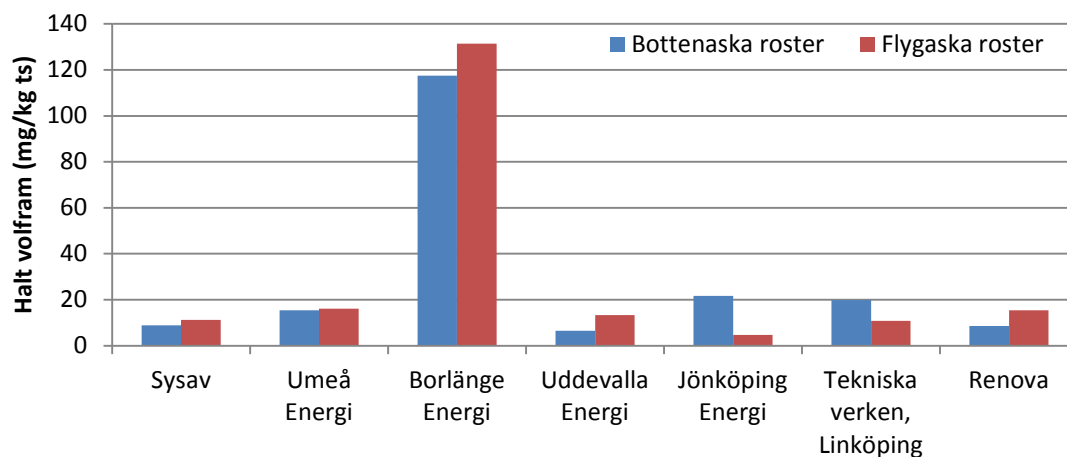
Kort kan man sammanfatta alternativen med att XRF är en relativt okänslig teknik dvs. man klarar inte att bestämma många av de kritiska grundämnena som finns närvarande i relativt låga halter. NAA är en relativt ovanlig instrumentell teknik som bara finns tillgänglig i ett fåtal laboratorier. Vanligen analyseras askor med ICP-OES eller ICP-MS, där ICP-MS är betydligt känsligare och lämpar sig därför bäst för många av de kritiska grundämnena. Provupparbetning av askor inför analys med ICP-OES eller ICP-MS görs typiskt genom mikrovågsuppslutning av provet i syra eller via smälta (ofta litiummetaborat eller litiumtetraborat men det finns även andra smältor) som sedan löses i syra. För platinagruppens metaller och Au kan man också göra upparbetning genom s.k. ”fire assay”-tekniker som ger en uppkoncentrering av dessa metaller men typiskt görs dessa analyser med instrument speciellt avsedda för ”fire assay”-tekniker.

Smältor baserade på litium-metaborat och tetraborat är väldigt bra för att lösa upp oxidiska material men fungerar bara för oxidiska material. Mikrovågsuppslutning i syra vid relativt höga temperaturer fungerar både för oxidiska och metalliska prover (men kan ha problem med ett fåtal extremt svårslösliga oxider) och är en väldigt generell uppslutningsmetod med avseende på både analyter och provmatriser.

Laboratoriet har tillgång till ICP-MS, ICP-OES, samt XRF samt möjlighet att arbeta både med syrauppslutning i mikrovågsgugn och smälta. Valet föll på syrauppslutning i mikrovågsgugn med efterföljande analys med högupplösande ICP-MS. Det bedömdes som den metodik som gav störst möjlighet att detektera låga halter av så många av de kritiska metallerna som möjligt.

### 6.1.2 Osäkerheter

Vid undersökningen av halterna av kritiska metaller finns det naturligtvis en hel rad osäkerheter som kan påverka resultaten. En av de största felkällorna är sannolikt provtagningen av askan. I projektet har aska samlats in från 2-3 veckors drift, vilket i sig är en väldigt liten del av året för att representera hela askflödet. Dessutom har anläggningarna av praktiska och arbetsmiljömässiga skäl varit begränsade i antal delprover och provvolymen likväl som exakt var i anläggningen det har gått att få ut prov. Skillnaderna i halter har dock varit förvånansvärt små även om det för enstaka parametrar varit större skillnad mellan anläggningarna. Ett exempel på detta är volfram, vilket visas i Figur 35. Där utmärkte sig en anläggning med en mycket högre halt än de andra. Det var inte bara bottenaskan som avvek utan även halten i flygaskan var hög vilket gör det mindre sannolikt att det enbart skulle bero på ett icke representativt askprov för den perioden provet togs ut. Om sedan de höga halterna var representativt för askinnehållet på ett helt år är dock en annan fråga som inte går att svara på.



Figur 35. Halter av volfram i askor från sju svenska avfallseldade rosteranläggningar.

Figure 35. Concentrations of tungsten in the residues from seven grate fired Swedish waste-to-energy plants. Red bars indicate fly ash, blue bars bottom ash.

Hantering på laboratoriet med den provhantering och neddelning som gjorts av de inkomna proven är en annan potentiell felkälla. Med anledning av detta har det gjorts en uppskattning av hur heterogena proverna är med avseende på de kritiska grundämnena samt P, Al, Cu och Zn (när provuttag och provupparbetning görs enligt beskrivningen i avsnitt 3.3 Provberedning), och om det finns en skillnad mellan de olika grundämnena. Den relativa standardavvikelsen för repeterbarheten för enkelprov,  $s_r$ , uppskattades därför från skillnader mellan replikat för varje grundämne (exklusive de ämnen vars halt ligger under rapporteringsgränsen) och ges i Tabell 12 för flygaska respektive bottenaska.

Typiskt ligger värdena på  $s_r$  för olika grundämnen för både flygaska och bottenaska mellan 5-20 % men ett undantag är  $s_r$  för Cu i bottenaska som ligger på ca 70 %. Analys av referensmaterial, som är mycket mer homogena än proverna, ger en betydligt lägre  $s_r$  (typiskt <3 %) och man kan dra slutsatsen att det är provernas heterogenitet som är det dominerande bidraget till  $s_r$ . Värdena på  $s_r$  kan anses vara bra med tanke på hur heterogena proverna är och storleken på analysproverna (0,1 g). Det finns inget tydligt koncentrationsberoende för  $s_r$ . Det är inte klarlagt vad det avvikande och höga värdet på  $s_r$  för Cu i bottenaska (men inte i flygaska) beror på, men en hypotes är att Cu i bottenaska till stor del utgörs av relativt tunna metalliska Cu-trådar som är svåra att mala dvs. Cu är inte tillräckligt homogent fördelat i det pulver som analyseras. Av denna anledning anges halter för båda replikaten för Cu i bottenaska i resultattabellerna i bilaga D.

Tabell 12. Uppskattad relativ standardavvikelse,  $s_r$ , för enkelprov för flygaska och bottenaska.

Table 12. Estimated relative standard deviation,  $s_r$ , for a single sample of fly ash and bottom ash.

	sr (%) Flygaska	sr (%) Bottenaska		sr (%) Flygaska	sr (%) Bottenaska
Be	10	16	La	11	15
Mg	10	7	Ce	12	11
Co	17	35	Pr	15	15
Ga	13	10	Nd	18	19
Ge	5	12	Sm	11	11
In	-	-	Eu	22	8
Sb	9	7	Gd	7	16
Nb	8	7	Tb	11	7
Ta	33	23	Dy	12	13
W	19	37	Ho	9	16
Ru	-	-	Er	10	11
Rh	-	-	Tm	13	8
Pd	-	-	Yb	8	10
Ir	-	-	Lu	7	12
Pt	-	-	P	3	7
Ag	5	32	Al	3	15
Au	-	-	Cu	4	69
Sc	11	12	Zn	2	11
Y	9	11			

Även asktyperna skilde sig åt en del, när det gällde bottenaska så var tre av askorna tagna efter metallseparering medan fyra var tagna innan. Det visade sig dock inte vara någon skillnad i halter mellan dessa. Före den kemiska analysen plockades det bort större icke malbara föremål som kvarnen inte kan hantera, vilket kan vara en del av förklaringen till att det i slutändan inte blir någon skillnad. Provtuttaget är för litet för att få ett representativt mått över hur mycket icke malbara fraktion som finns i askan. Vid neddelningen i de två replikaten på laboratoriet kunde det ena replikatet innehålla väldigt lite icke malbara material medan det i det andra fanns något större objekt som påverkar balansen kraftigt. Exempel på detta kan ses i Figur 36. Eftersom det var så stor skillnad mellan duplikaten har inte heller dessa metallmängder analyserats och adderats till den andra haltbestämningen. En silversked i ett av proven skulle exempelvis påverka hela serien väldigt kraftigt.



Figur 36. Exempel på bortplockade icke malbara metaller från provet innan kemisk analys. Den vänstra bilden (Sysav) representerar en aska som genomgått metallseparation innan provtagningen medan den högra (Renova) representerar en anläggning som tagit prov innan metallseparation. De två siffrorna i varje bild representerar mängden som är bortplockat från respektive replikat.

Figure 36. Examples of the amounts of metals that was hand sorted out of the sample before chemical analysis. The left (Sysav) represents an ash that have been through a metal sorting facility before the sample was taken while the right (Renova) represents an ash where the sample was taken before metal separation. The numbers in the pictures give the amount of metals that was sorted out of each replicate.

Även för flygaskorna har det varierat vilken typ av aska som tagits ut, i vissa fall har det varit elfilteraska, i andra aska från textilfilter (NID) och i någon en kombination av vändschaktsaska och filteraska. Detta påverkar naturligtvis resultaten och man kan diskutera riktigheten i att beräkna ett medelvärde på flygaska utifrån dessa och sedan skala upp dem till nationell nivå. Skillnaderna i halter har dock, i de flesta fall, varit små, även om Borlänge och till viss del Jönköping för de flesta metallerna hade lägst värden av rosterpannorna (undantaget volfram som tidigare nämnts i fallet med Borlänge). Detta beror sannolikt på att dessa prover är uttagna efter att reagent (kalk och aktivt kol) är tillsatt och båda anläggningarna har bara torr rening (Jönköping har dock rökgaskondensering) vilket gör att de får tillsätta mer reagent i den torra reningen än de som har våt rening. Samma tendens kunde inte ses i bottenaskorna för dessa båda anläggningar.

### 6.1.3 Jämförelse fluidbädd och rosterteknik

Flygaskflödet från fb-pannor är generellt betydligt större än för rosterpannor. Med det i åtanke hade ett tänkbart scenario varit att halterna i fb-flygaskan skulle kunna bli ”utspädda” och därmed lägre än i flygaskan från rosterpanna. Så såg dock inte verkligheten ut utan för alla kritiska metaller utom antimon, germanium och magnesium var halterna högre i flygaskan från fb-pannorna. Även om bäddkemi och förbränningstemperatur spelar in så är det sannolikt inte förklaringen eftersom halterna var högre även i bottenaskan från fb-pannorna. Med tanke på att halterna i askan för de flesta metallerna är lägre än den genomsnittliga halten i jordskorpan är en tänkbar hypotes att bäddsanden som fb-pannorna använder innehåller högre halter av de kritiska metallerna än vad askan från

avfallsförbränningen gör. Det har dock inte varit möjligt att inom projektets tids- och budgetram verifiera om så är fallet.

#### 6.1.4 Fördelning genom pannan

Fortum tog ut fyra askprover, ur sin panna 6, som analyserades för de kritiska metallerna. För de flesta metallerna kunde man inte se någon tydlig trend även om det för några sällsynta jordartsmetaller (se Figur 25) tycktes vara högst halter i bottenaskan för att sedan sjunka gradvis genom pannan. När man såg till medlet för de tre deltagande fb-pannorna så var generellt halten i bottenaskan högre än den i flygaskan.

För aluminium, fosfor och zink var trenden tvärtom att det var högre halter i flygaskan vilket också för aluminium och zink är i linje med vad man kan hitta i litteraturen [36].

Några större slutsatser ska dock inte dras från resultaten eftersom de också bara är från ett provtillfälle. Om teorin att det är bäddsandens som innehåller det mesta av de kritiska metallerna stämmer är det även logiskt att det inte är så stora skillnader genom pannan eftersom bäddsandens i en fb-panna finns med i alla askfraktionerna.

#### 6.1.5 Fördelning i olika storleksfraktioner

Resultaten är enbart baserade på en siktanalys och gjordes för att se om det fanns tendenser till anrikning i någon storleksfraktion. Det var egentligen bara silver av de kritiska metallerna som visade en tendens att vara överrepresenterat i den minsta fraktionen (<5,6 mm) och kobolt som var överrepresenterat i mellanfraktionen. Silver används mycket i elektronik, smycken, katalysatorer, speglar och kameror (se bilaga B.14) men har också börjat dyka upp som antibakteriellt medel i olika produkter. Rena större silverföremål skulle också troligen ha plockats ut innan analysen (som ett ej malningsbart föremål) vilket också kan påverka. Det finns dock erfarenheter som pekar på att ädelmetaller (som guld och silver) ofta är överrepresenterade i finare fraktioner [37].

Kobolt används främst i olika legeringar men också i exempelvis färgpigment i porslin och lim för gummiapplikationer, inte heller här ses någon klar förklaring till varför den skulle vara överrepresenterad i mellanfraktionen. Det krävs fler analyser för att kunna fastställa att så är fallet och då eventuellt kunna härleda källorna.

## 6.2 Uppskalning till Sverigenivå

Vid uppskalningen till Sverigenivå finns det en rad olika faktorer som påverkar beräkningarna. En faktor är osäkerheten i statistiken på askmängder. Avfall Sverige samlar in data varje år vilket är ett gott underlag. Sämre dokumenterat är torrhalterna i de olika strömmarna, och de antaganden som gjorts täcker inte alla fall. Exempelvis är de mängder som Renova rapporterar in en stabiliserad bambergkaka med betydligt lägre torrhalt (63 % TS) än den antagna (90 % TS). Även fördelningen mellan askor från roster- och fb-pannor blir en osäkerhet i sammanhanget eftersom det till Avfall Sverige rapporteras in totala mängder för anläggningarna och inte specifikt för varje panna.

Medelvärdena har inte heller viktats mot askmängderna på respektive anläggning, detta för att det varit olika asktyper som provtagits och storleken på de enskilda strömmarna i sig i många fall kan vara okända. Dessutom ingår inte heller den statistiken i det underlag som Avfall Sverige samlar in.

Totalt sett bedöms beräkningen i alla fall ge en god bild av de mängder som finns i svenska avfallsaskor.

### 6.3 Ekonomisk potential och möjligheter till återvinning

Även om halterna av flertalet av de kritiska metallerna är låga (lägre än den genomsnittliga bakgrundshalten i jordskorpan) visar det sig att det är potentiellt mycket stora värden som askorna representerar. I Figur 33 visas värdena för de olika metallerna och tillsammans uppgår det till 1,3 miljarder svenska kronor. Det är heller inte nödvändigtvis de ämnen som har högst halt som representerar det största värdet. De metaller som representerar de största värdena är lutetium, ytterbium, skandium, tulium och magnesium där lutetium är det ämne som det finns minst av i askorna (bortsett från de ämnen vars koncentration var under rapportgränsen). Förklaringen är att vissa av dessa metaller har väldigt höga priser där lutetium är det tydligaste exemplet. Lutetium kostar idag nästan 10 gånger mer än guld.

En fråga är om det finns en tillräcklig marknad för vissa av ämnena där världsproduktionen räknas i några få ton per år. Exempelvis så motsvarar mängden skandium i de svenska askorna en dryg tredjedel av världsproduktionen och detta trots att halten är klart lägre (2-5 mg/kg) än de genomsnittliga halterna i jordskorpan (18-25 mg/kg).

När den ekonomiska potentialen diskuteras måste också hänsyn tas till att kostnader för upprening och framställning av de rena metallerna kan vara väldigt dyr från aska. Kostnaderna skiljer också mellan olika metaller. Dessa kostnader har dock inte omfattats i detta projekt.

För en del av de kritiska metallerna sker en betydande del av handeln i oxidform och prisbildningen för vissa sådana finns också presenterat i Tabell 13 i bilaga C. Sannolikt förekommer också en hel del ämnen i oxidform i askan och den prisbildningen kanske är mer rättvisande. Dock kvarstår frågan om vad det kostar att rena fram oxiderna och om det är möjligt.

Metallpriserna som anges i Tabell 13 i bilaga C är framförallt hämtade från MetalPrices.com som dels samlar data från råvarubörser och dels genom öppna marknadsundersökningar. Guld, silver, platina, aluminium m.fl. är metaller som handlas på råvarubörser, exempelvis London Metal Exchange (LME) och Shanghai Metal Exchange (SHME), och därifrån hämtar MetalPrices priser för dessa metaller. Priserna för övriga metaller, exempelvis de sällsynta jordartsmetallerna, är priser över disk. Dessa priser anges baserat på en öppen marknadsundersökningsmetod vilket inkluderar en specialist som kontaktar köpare, säljare, gjutierier osv. Kvaliteten på priset är beroende på specialistens erfarenhet och kunskap av branschen. Det satta priset påverkas även av vilken del av distributionskedjan som kontaktas. Vid en jämförelse mellan priser från MetalPrices.com och priser från en likvärdig källa MetalPages.com visar det sig att priserna från MetalPrices ligger något lägre. Även på MetalPages tillämpas metoden med öppen marknadsundersökning. Orsaker till



skillnaden i pris mellan MetalPrices och Metal-Prices kan vara att de nyttjar något olika tillvägagångssätt vid den öppna marknadsundersökningsmetoden samt att de innehar kontakter i olika delar av distributionskedjan, i övrigt är skillnaden oklar.

Återvinning av metaller har fått höjd status och SGU ska tillsammans med Naturvårdsverket kartlägga potentialen för återvinning av metaller och mineraler i Sverige [38]. Det finns väldigt lite återvinning av sällsynta jordartsmetaller idag (ca 1 % och då i stort sett enbart i form av permanentmagneter som återvinns [1]). De sällsynta jordartsmetallerna är dock ett område som det satsas en hel del på. För tillfället löper det minst två stora EU-projekt inom området att få till en hållbar produktion av sällsynta jordartsmetaller samt återvinning från elektronik [39, 40].

Halterna av de flesta metallerna var låga, fördelen de har jämfört med primärproduktion av metallerna är att de redan är brutna och därför sparar in det arbetet. Huruvida det skulle kunna vara ekonomiskt gångbart att återvinna några av de kritiska metallerna är osäkert eftersom det traditionellt har funnits ganska lite forskning på just återvinning av dessa strömmar. Området har dock blivit mer aktuellt de senaste åren och det pågår nu mer forskning kring detta. Ett exempel är Waste Refinery projekt WR 58 där metallutvinning ur flygaska med fokus på zink studeras. Sannolikt finns det dock en rad andra återvinningsströmmar som ligger före i prioritet där halterna också är högre. Det som måste lösas då är insamlingsfrågan för dessa strömmar.

En aspekt som är tänkvärd är att de flesta av exempelvis de sällsynta jordartsmetallerna idag utvinns som biprodukter vid annan metallutvinning. Det är också en tänkbar väg att gå, att vissa av de kritiska metallerna utvinns som en bieffekt av exempelvis en askbehandling för att förbättra askans kvalitet eller som i WR 58 vid utvinning av zink ur flygaska.

Under projektets gång har det publicerats en tysk rapport kring metallinnehåll och återvinningspotential i askor som ger en indikation på hur ekonomiskt realistiskt det är att återvinna kritiska metaller ur askan. Rapporten innehåller inga halter för de sällsynta jordartsmetallerna utan konstaterar bara kort att med befintliga halter på 20-100 ppm så bedöms inte återvinningen vara av intresse [41].

Intresset för kritiska metaller i askor har höjts. När ansökan för detta projekt lämnades in fanns det väldigt lite forskning/utredningar på området och under den period som projektet har varat har det publicerats en schweizisk artikel [31], den nyss nämnda tyska studien samt att det enligt uppgift pågår ett projekt i Danmark [42].

Antimon uppvisas i höga halter, speciellt i vissa flygaskor från roosterpannor. I detta fall skulle det vara intressant att titta på möjligheter att utvinna metallen ur ett koncentrationsperspektiv. Det ekonomiska värdet är dock inte så högt men kan kanske vara värdefullt för de anläggningar där de högsta halterna av antimon föreligger. Troligen måste i så fall den utvinningen ske tillsammans med andra metaller.

## 7 Slutsatser

Med den analysmetod som använts går det att analysera alla de kritiska metallerna, som ingått i denna studie, med undantag för osmium. Valideringen visade god överensstämmelse mot referensmaterialen som använts.

Karaktäriseringen av askorna från de tio deltagande avfallsförbränningsanläggningarna visade på att det endast är låga halter av de flesta av de kritiska metallerna, både i flygaska och i bottenaska. Med undantag för antimon, kobolt, silver, tantal och volfram verkar alla halter vara under eller mycket nära den genomsnittliga halten i jordskorpan.

Guld, indium och platinametallerna förekommer generellt i lägre halter än rapportgränsen för analysmetoden (i flera fall bestäms rapportgränsen av närvaro av interfererande ämnen). Guld påvisas dock i vissa prov i klart högre halter.

Halterna i askorna från fb-pannorna var generellt högre än motsvarande halter i rosterpannorna (med undantag för exempelvis antimon, germanium och volfram). En hypotes är att bäddsanden har högre halter av de kritiska metallerna än vad själva askan har.

I rosterpannor tenderar antimon, germanium och silver att ha klart högre halt i flygaskan. För övriga av de kritiska metallerna i rosterpannor är koncentrationen ungefär lika (ett fåtal) eller större i bottenaskan.

För fb-pannorna är det främst silver som klart har en högre halt i flygaskan.

Vid generaliseringen av resultaten till sverigenivå har inte dessa mängder kunnat relateras till användningen i Sverige då det varit svårt att hitta information om detta. Istället har mängderna jämförts med världsproduktionen i de fall uppgifter kring den kunnat hittas. För någon enstaka metall (Sc) motsvarar mängderna i askan en väldigt stor andel av världsproduktionen (mer än en tredjedel), medan det för sex andra motsvarar någon eller några procent av världsproduktionen (Mg, Lu, Ho, Tb, Yb, Dy, Ga).

Även om halterna generellt är låga representerar de en stor ekonomisk potential om man bara tittar på det rena metallvärdet. Den sammanlagda potentialen för de kritiska metallerna i svenska askor uppgår till ca 1,3 miljarder kronor. Läger man därtill även kvarvarande mängder aluminium, koppar och zink ökar potentialen med ytterligare en miljard. Ingen hänsyn har då tagits till den praktiska genomförbarheten eller kostnaderna för utvinningen av metallerna.

De ämnen som varit svårast att få en god repeterbarhet på har för bottenaskor varit kobolt, koppar, silver, och volfram. Alla dessa har en relativ standardavvikelsen för repeterbarhet på enkelprov på >30 %, klart värst är koppar. För flygaska är det endast tantal som har motsvarande relativ standardavvikelse >30 %. Att det är fler ämnen som varit svårt att få god repeterbarhet i bottenaskan är naturligt då det är ett mer heterogent material.

## 8 Rekommendationer och användning

Projektet har genererat en värdefull sammanställning över de mängder kritiska metaller som finns i askorna från avfallsförbränningen. Ur denna aspekt saknar studien i dagsläget motsvarighet i den vetenskapliga litteraturen. Resultaten kan användas i kommunikation med såväl myndigheter som konsumenter samt andra parter som är intresserade av vad resterna från avfallsförbränningen innehåller.

Resultaten är ett värdefullt underlag när man ser till fortsatt forskning kring metallutvinning ur askor och kan användas för att prioritera vilka ämnen som är mest intressanta att utveckla metoder för. Kvantifieringarna ger också en bra bas för samarbetsdiskussioner med metallindustrin.

Projektet har också visat på att det förutom innehållet av de kritiska metallerna också finns betydande mängder av aluminium, koppar och zink kvar i askorna. Hur mycket av dessa mängder som i realiteten är återvinningsbar är ett område som vore intressant att studera i framtida arbeten.

För att det eventuellt ska vara ekonomiskt lönsamt att utvinna kritiska metaller ur askor bör det undersökas vilka processmöjligheter som finns för detta ändamål. I detta sammanhang vore det också intressant att titta på förekomstformer av några av de metallerna med högst ekonomisk potential.

## 9 Litteraturreferenser

- [1.] European Commission, "Critical raw materials for the EU; Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials", E. Commission, Brussels, 2010.
- [2.] European commission. 2010 [cited 2012; Available from: [http://ec.europa.eu/enterprise/magazine/articles/industrial-policy/article\\_10514\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/magazine/articles/industrial-policy/article_10514_en.htm).
- [3.] Todorovic, J. and H. Ecke, "Treatment of MSWI Residues for Utilization as Secondary Construction Minerals: A Review of Methods". Minerals & Energy, 2006. **20**(3-4): p. 45-59.
- [4.] Björefors, F. and C. Ulrich, "Elektrokemisk metallåtervinning ur slagg och flygaska", F 2009:07, Malmö, Sweden, 2009.
- [5.] Fedje, K.K., "Metals in MSWI fly ash - problems or opportunities?", in Department of Chemical and Biological Engineering 2010, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden.
- [6.] Van Gerven, T., et al., "Extraction of heavy metals from municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash with organic solutions". Journal of Hazardous Materials, 2007. **140**(1-2): p. 376-381.
- [7.] Lindskog, Å., "Uppföljande undersökning av dioxin i rester från svensk avfallsförbränning", F2009:08, A.S. Utveckling, Malmö, 2009.
- [8.] Ahlgren, N. and S. Marklund, "Förbränning av avfall - En kunskapssammanställning om dioxiner", RVF rapport 01:13, 147, Malmö, 2001.
- [9.] Hartlén, J. and R. Grönholm, "Kvalitetssäkring av slaggrus från förbränning av avfall", RVF rapport 2002:10, RVF, Malmö, 2002.
- [10.] EC, "Critical raw materials for the EU; Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials", Brussels, 2010.
- [11.] Sveriges geologiska undersökningar. "Metaller och mineral november 2013". 2013 November 2013; Available from: <http://www.sgu.se/dokument/nyhetsbrev/metaller-och-mineral-november-2013.pdf>.
- [12.] NOAH. "Aske fra avfallsforbrenningsanlegg". [cited 2013 28 Februari ]; Available from: <http://www.noah.no/Forkunder/Kundeguide/Hvabehandlervi/Askefraforbrenningsanlegg/tabid/573/Default.aspx>.
- [13.] BSH Umweltservice AG. "Filter- und Flugaschenwäsche (FLUWA-Verfahren)". [cited 2013 February 28]; Available from: [http://www.bsh.ch/de/produkte/filter--und-flugaschenwaesche-\(fluwa\).aspx](http://www.bsh.ch/de/produkte/filter--und-flugaschenwaesche-(fluwa).aspx).
- [14.] Schlumberger, S. "Neue Technologien und Möglichkeiten der Behandlung von Rauchgasreinigungsrückständen im Sinne eines nachhaltigen Ressourcenmanagements". [cited 2013 February 28]; Available from: <http://www.bsh.ch/upload/public/0/71/BSH-Umweltservice-AG-Zinkrueckgewinnung-und-Ascherueckfuehrung-FLUREC-Verfahren.pdf>.
- [15.] Böni, D., F. Adam, and F. Böni, "Technischer Statusbericht Termo-Recycling Stand Oktober 2011", Z.S.Z.f.n.a.-u. ressourcennutzung, Hinwil, 2011.
- [16.] Muchová.L. and P.C. Rem. "Metal content and recovery of MSWI bottom ash in Amsterdam". in Waste Management and the Environment. 2006. Witpress.

- [17.] Rem, P.C., et al., "The Amsterdam pilot on bottom ash". *Minerals Engineering*, 2004. **17**: p. 363-365.
- [18.] Johansson, A., et al., "Siktning av avfall", WR06, Borås, 2008.
- [19.] Todorovic, J., "Siktning av bottenaskor från avfallsförbränning", Waste Refinery rapport WR25, Borås, 2010.
- [20.] Steenari, B.-M. and D. Zhao, "Vattentvätt av flygaska från avfallsförbränning", Waste Refinery rapport WR-17, Borås, 2010.
- [21.] NORDTEST, "Solid waste, particulate materialas: Sampling NT ENVIR 004 ", Nordtest, Espo, 1996.
- [22.] EPOW, "Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England.", E.A. European Pathway to Zero Waste, Reading, 2011.
- [23.] U.S. Geological Survey, "Rare earth elements - Critical resources for high technology", U.S. Geological Survey Fact sheet 087-02, U.S.G. Survey, 2002.
- [24.] U. S. Geological Survey, "Mineral commodity summaries 2013", 198, U.S.G. Survey, 2013.
- [25.] "EnvironmentalChemistry.com". [cited 2013 2013-11-01]; Available from: <http://environmentalchemistry.com/>.
- [26.] Metalprices.com. 2013 [cited 2013 Oktober 2013]; Available from: <http://www.metalprices.com/>.
- [27.] Chemicool.com. 2013 [cited 2013 2013-10-22]; Available from: [www.chemicool.com](http://www.chemicool.com).
- [28.] Mineralprices.com. 2013 [cited 2013 2013-10-22].
- [29.] Sveriges geologiska undersökningar. "Metaller och mineral oktober 2013". 2013 [cited 2013; Available from: <http://www.sgu.se/dokument/nyhetsbrev/metaller-och-mineral-oktober-2013.pdf>].
- [30.] Kougemitrou, I., et al., "Characterisation and management of ash produced in the hospital waste incinerator of Athens, Greece". *Journal of Hazardous Materials*, 2011. **187**(1–3): p. 421-432.
- [31.] Morf, L.S., et al., "Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant". *Waste Management*, 2013. **33**(3): p. 634-644.
- [32.] Zhang, F.-S., S. Yamasaki, and K. Kimura, "Rare earth element content in various waste ashes and the potential risk to Japanese soils". *Environment International*, 2001. **27**(5): p. 393-398.
- [33.] Zhao, L., F.-S. Zhang, and J. Zhang, "Chemical properties of rare earth elements in typical medical waste incinerator ashes in China". *Journal of Hazardous Materials*, 2008. **158**(2–3): p. 465-470.
- [34.] Värmeforsk, "Databasen Allaska", 2012.
- [35.] Sotkamo Silver. "Sotkamo silver- projects in brief". 2013 [cited 2013; Available from: <http://www.silver.fi/sivu/en/projects/>].
- [36.] Chandler, A.J., et al., eds. "Municipal solid waste incinerator residues". 1997, Elsevier: Amsterdam, New York.
- [37.] Böni, D., "Personlig kommunikation", 2011, KEZO: Hinwil.
- [38.] Sveriges Geologiska Undersökningar. "SGU kartlägger potentialen för återvinning av metaller i Sverige". 2013 [cited 2013; Available from: <http://www.sgu.se/sgu/sv/produkter-tjanster/nyheter/nyheter-2013/sgu-kartlagger-potentialen-for-atervinning-av-metaller-i-sverige.html>].
- [39.] "RECLAIM - From ore to sustainable mining". [cited 2013; EU-project within 7th framework programme]. Available from: <http://www.re-claim.eu/>.

- [40.] "EURARE - sustainable exploitation". [cited 2013; EU-project within 2012 cooperation work programme for nanotechnologies, materials and new production technologies, Topic NMP 2012.4.1-1]. Available from: <http://www.eurare.eu/about.html>.
- [41.] Deike, R., R. Warnecke, and M. Vogell, "Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“, 89, ITAD, 2012.
- [42.] Nedenskog, J., 2013.
- [43.] Lide, D.R., ed. "CRC Handbook of Chemistry and Physics". ed. B. Raton2004, CRC Press.

## A Provtagningsinstruktioner Sysav

### A.1 Provtagning av flygaska från Panna 3 och Panna 4

#### Varför?

Provtagningen görs till ett forskningsprojekt som skall undersöka om det går att utvinna zink ur flygaskan (Waste Refinery projekt WR58).

#### Skyddsutrustning

Korgglasögon, skyddsmask och handskar skall bäras vid provtagning.

#### Provtagningsutrustning

Pappskiva, litermått, spillkärl, provtagningsspann av plast med tätslutande lock, extra plastspann med tätslutande lock.

#### Provtagningsstillfällena

Prover tas tre gånger per dygn från den tisdagen 26 februari 2013 till och med fredag den 7 mars. Prov tas ca kl 0730, 1530 och 2330. Se schema nedan.

#### Tillvägagångssätt

- Lägg Spillkärlet under luckan innan den öppnas. Se till att aska som spills ut ur luckan faller i spillkärlet.
- Rensa öppningen från askhögar.
- För in pappskivan under askan som faller ner så att så mycket aska som möjligt fångas upp.
- Ta ut pappskivan efter två sekunder och håll askan i litermättet. Upprepa till dess att det finns minst 4 dl i måttet.
- Håll askan i extraspannen till dess att det är 4 dl kvar i måttet.
- Håll de kvarvarande 4 dl i provtagningsspannen.
- Bocka av provtagningsstillfället i schemat nedan

#### Provtagningsschema

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Tisdag 26/2 kl 0730  | <input type="checkbox"/> Söndag 2/3 kl 2330  |
| <input type="checkbox"/> Tisdag 26/2 kl 1530  | <input type="checkbox"/> Måndag 3/3 kl 0730  |
| <input type="checkbox"/> Tisdag 26/2 kl 2330  | <input type="checkbox"/> Måndag 3/3 kl 1530  |
| <input type="checkbox"/> Onsdag 27/2 kl 0730  | <input type="checkbox"/> Måndag 3/3 kl 2330  |
| <input type="checkbox"/> Onsdag 27/2 kl 1530  | <input type="checkbox"/> Tisdag 4/3 kl 0730  |
| <input type="checkbox"/> Onsdag 27/2 kl 2330  | <input type="checkbox"/> Tisdag 4/3 kl 1530  |
| <input type="checkbox"/> torsdag 28/2 kl 0730 | <input type="checkbox"/> Tisdag 4/3 kl 2330  |
| <input type="checkbox"/> torsdag 28/2 kl 1530 | <input type="checkbox"/> Onsdag 5/3 kl 0730  |
| <input type="checkbox"/> torsdag 28/2 kl 2330 | <input type="checkbox"/> Onsdag 5/3 kl 1530  |
| <input type="checkbox"/> Fredag 29/2 kl 0730  | <input type="checkbox"/> Onsdag 5/3 kl 2330  |
| <input type="checkbox"/> Fredag 29/2 kl 1530  | <input type="checkbox"/> torsdag 6/3 kl 0730 |
| <input type="checkbox"/> Fredag 29/2 kl 2330  | <input type="checkbox"/> torsdag 6/3 kl 1530 |
| <input type="checkbox"/> Lördag 1/3 kl 0730   | <input type="checkbox"/> torsdag 6/3 kl 2330 |
| <input type="checkbox"/> Lördag 1/3 kl 1530   | <input type="checkbox"/> Fredag 7/3 kl 0730  |
| <input type="checkbox"/> Lördag 1/3 kl 2330   | <input type="checkbox"/> Fredag 7/3 kl 1530  |
| <input type="checkbox"/> Söndag 2/3 kl 0730   | <input type="checkbox"/> Fredag 7/3 kl 2330  |
| <input type="checkbox"/> Söndag 2/3 kl 1530   |  |





## Resultat

Prover togs enligt schemat ovan. Dock stannades Linje 4 vid ett tillfälle varvid provtagningen senarelades till dess att pannan var i gång igen. Totalt samlades ca 10 kg aska in.

## A.2 Provtagning av slaggrus från Panna 3 och Panna 4

### Steg 1, Insamling av slagg

#### Varför

Provtagningen görs till ett forskningsprojekt som skall undersöka om det finns sällsynta jordartsmetaller i slaggruset (Waste Refinery projekt WR 56).

#### Provtagningstillfällen

Slagg skall samlas in från det nya avfallskraftvärmeverket (Panna 3 och 4) från morgonen av tisdagen den 26 februari till och med kvällen av fredagen den 8 mars.

#### Skyddsutrustning

All insamling sker med hjullastare.

#### Tillvägagångssätt

Föraren i en lastbil med slagg från nya kraftvärmeverket (Panna 3 och 4) anropar personal på slaggsorteringsanläggningen så de kan möta upp vid ankomsten.

Slaggen tippas av på, av personalen, anvisad plats.

Med hjullastare avlägsnas en skopa (ca 4 ton) ur slagghögen. Skopan töms på bestämd plats där den samlas till dess den är färdig att köras genom slaggsorteringen.

Resten av slaggen lastas ut i upplaget och kan blandas med annan slagg.

Den utsorterade slaggen lagras tills dess den är torr nog att köras i sorteringsanläggningen

Vid frågor kontakta

Jerry, Kent eller

Raul Grönholm

## Resultat

Under perioden förbrändes ca 19000 ton avfall i Sysavs panna 3 och 4. Ur det producerades 3765 ton slaggrus (ca 20 %). Det transporterade till Sysavs sorteringsanläggning med lastbil (ca 20 ton/lass). Totalt ca 190 transporter. Då det är omöjligt att lagra en så stor mängd så togs ett delprov (ca 4 ton) ut ur varje transport att mängden reducerades till 756,5 ton (ca 20 % av slaggen).

Slaggen lagrades därefter utomhus utan skydd till dess att den hade torkat nog för att sorteras i Sysavs slaggsorteringsanläggning. Lagringen gjordes mellan 8/3-29/5.

## Steg 2 Provtagning av slagg

- Slaggen processa på vanligt sätt i slaggsorteringen.
- Provtagning sker 4 gånger i timmen. Var 15e minut tas ett prov från den fallande slaggströmmen från slaggutmatningsbandet. Totalt skall 50 prov tas på hela mängden
- Skopan körs in under bandet och därefter lägger föraren i backen och backar bort. Minsta mängd är ett kg.
- Skopan töms i en liten container.
- När containern är full vägs den och tippas på en asfaltyta.

Vidare provtagning görs när allt slaggrus processats.

### Massbalans för slagg

Töm alla fickor innan slaggen körs

- Väg mängden slagg som lastas in i anläggningen
- Väg alla lass som körs bort från anläggningen
- När körningen är klar töms och vägs alla fraktioner som sorterats bort.
- Jerry N har blanketter för att anteckna mängderna

### Resultat

Totalt producerades 3765 ton slaggrus under perioden. Då det är omöjligt att lagra en så stor mängd så togs ett delprov ut ur varje transport så att mängden reducerades till 756,5 ton.

756,5 ton slagg sorterades i Sysav sorteringsanläggning. 58 ton metall sorterades bort. Det tog 17 timmar att sortera ut 698,5 ton slaggrus. På slaggruset togs ett prov från fallande ström med en hjullastare var 15e minut. Totalt togs 68 delprov. Totalprovsmängden blev 10,3 ton vilket är ca 150 kg per delprov.

Totalprovet delades därefter ner med kon och kvadreringsmetoden. Neddelning och omblandning gjordes tre gånger varefter kvarvarande mängd (ca 1,3 ton) breddes ut till en "pannkaka". Den sektoriserades i 8 sektorer och därefter togs två strukna spadtag ur varje sektor till ett analysprov. Analysprovet vägde ca 25 kg

## B Information om de kritiska metallerna

Texten i detta appendix är en systematisk genomgång av de aktuella metallerna. För varje metall finns en allmän beskrivning, följt av förekomst och produktion. Vidare beskrivs vad metallen används till och i vilken grad den återvinns.

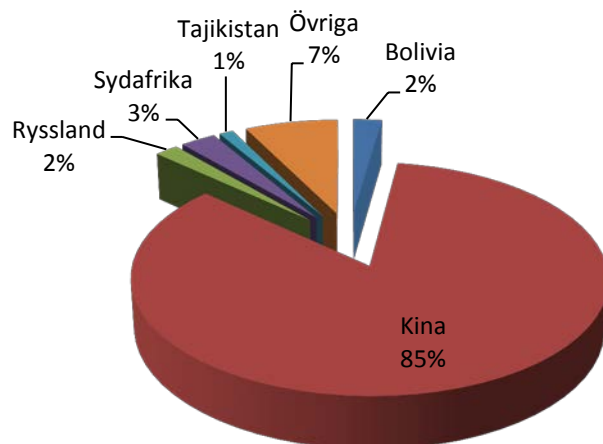
### B.1 Antimon, Sb

#### Allmänt

Antimon är en skinande silvervit metall med halvledaregenskaper. Det är en spröd metall som är svår att forma, av den anledningen används den inte heller i någon större utsträckning i sin metalliska form, däremot är den vanlig i olika legeringar eller i olika antimonföreningar (exempelvis oxider). Antimon är giftigt och vid halter om  $50 \text{ mg/m}^3$  är den direkt livshotande [1].

#### Förekomst och produktion

Jordskorpan utgörs totalt sett av Antimon till 0,2 ppm [2]. När det gäller brytbara fyndigheter är dessa främst från vulkaniska bergarter och sandsten med en genomsnittlig antimonhalt på 1 ppm [3]. Kina dominerar kraftigt med 85 % av produktionen [5] (se Figur 37) och 2010 producerades/utvanns mindre än 1 % av världens antimon inom EU [4].



Figur 37. Utvinning av antimon från gruvdrift 2012. Total utvunnen mängd 180 000 ton [5].

Figure 37. Extraction of antimony from mining in 2012. Total amount extracted: 180 000 tons [5].

#### Användning

Antimon har använts länge, och det finns spår från användning i exempelvis keramik och smink från 4000 f.Kr. I Egypten så användes det för att plätera andra metaller 2400 f.Kr. Användningen tog dock fart med industrialiseringen i början av 1900-talet, se Figur 38.

#### Antimon

Kemisk beteckning: Sb

Atomnummer: 51

Atomvikt: 121,76 u

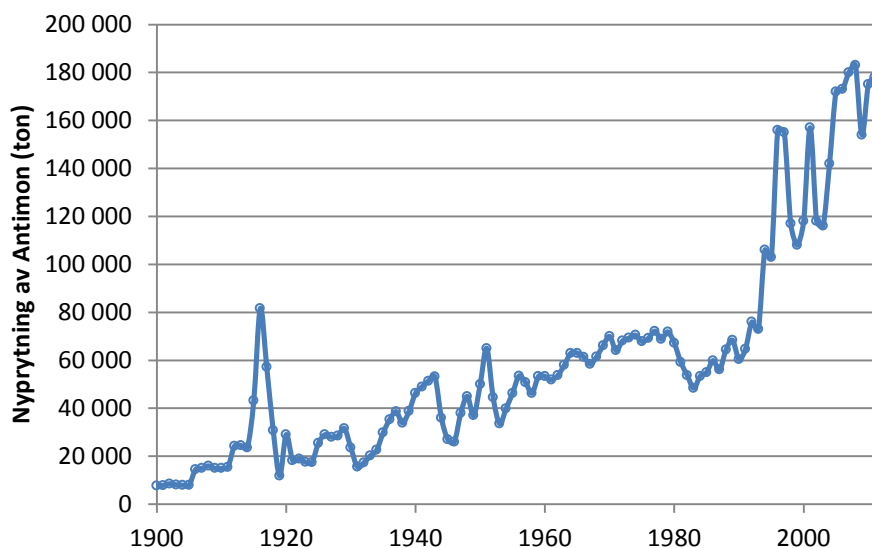
Densitet:  $6697 \text{ kg/m}^3$

Smältpunkt: 903,78 K

Kokpunkt: 1860 K



Bildkälla: Wikipedia



Figur 38. Den historiska utvecklingen av nyproduktion av antimon i världen [6].

Figure 38. The historical development of the production of antimony in the world [6].

Antimon används idag inom en rad olika områden [7]:

- Flamskyddsmedel i plast (och textil) är det största användningsområdet (ca 72 %, 2005). Här kan dock vissa organiska ämnen och hydrerad aluminiumoxid vara fullgoda ersättare.
- Blybatterier har varit ett stort användningsområde (19 %, 2005) som dock förväntas minska i takt med att blybatterierna ersätts av andra batterityper.
- Antimon används för att motverka att det bildas bubblor i glaset, tidigare användes arsenik men detta har ersatts med antimon. Glas innehåller ca 0,8 % antimon.
- Katalysator vid tillverkning av polyesterplaster (exempelvis PET).
- Antimon används som pigment i olika färger främst i plast och även som stabilisator i exempelvis PVC-plast för att motverka nedbrytningen av solljus.
- Halvledare och mikrokondensatorer spås vara områden som användningen av antimon kommer växa inom

Under 2010 importerade Sverige 17 ton antimon i metallisk form och 219 ton i oxidform [4].

### Återvinning

Den antimon som återvinns kommer främst från återvinningen av blybatterier, en viss oavsiktlig återvinning av antimon sker också när plast materialåtervinns då antimon redan finns i materialet, vilket kan minska behovet av att tillsätta ny antimon till plastprodukterna tillverkade av återvunnen plast [1]. Kommissionen har i sin rapport om kritiska metaller anggett att det i litteraturen finns rapporterade återvinningsnivåer mellan 3-20 %, det är dock osäkert vilken bas detta är räknat på. Återvinningen av antimon kommer troligen att minska i takt med att blybatterier minskar och därmed också återvinningen av dessa.

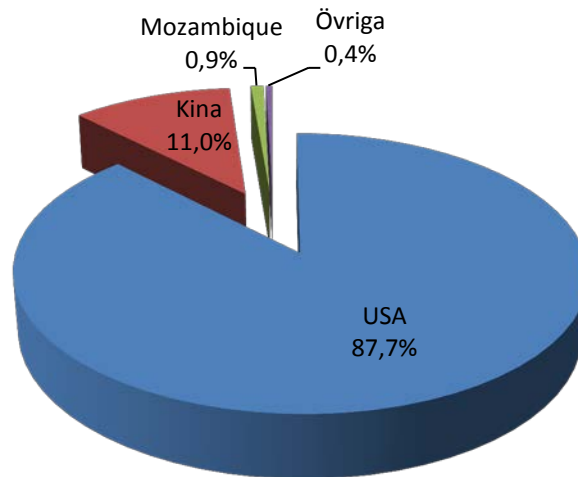
## B.2 Beryllium, Be

### Allmänt

Beryllium upptäcktes 1798 av fransmannen Louis Vauquelin men metallen framställdes för första gången 1828 [8]. Beryllium är en blank silvervit metall som tillhör gruppen alkaliska jordartsmetaller. Det är en hård men spröd metall med goda mekaniska och termiska egenskaper, speciellt i relation till sin låga densitet. Både metallen samt dess salter är mycket giftiga och cancerogena. Eftersom metallen används mycket i försvarsapplikationer är det en strategisk och dyr metall [3].

### Förekomst och produktion

Den genomsnittliga halten av beryllium i jordskorpan är ca 3 ppm [4], den finns dock i högre halter i vissa mineraler. När det gäller produktionen av Beryllium domineras den av USA, se Figur 39, som har cirka 2/3 av världens kända reserver [5]. De mineraler som bryts innehåller ofta 0,3-1,5 % beryllium.



Figur 39. Primärproduktionen av beryllium 2012, total mängd producerad: 230 ton [5].

Figure 39. The main production of beryllium in 2012, total amount produced: 230 tons [5].

### Användning

Beryllium har många olika användningsområden, se Figur 40. Beryllium genererar inte gnistor vilket gör att legeringar med beryllium används till borrar inom olje- och gasindustrin och som bromsar i landningsställ på flygplan. Olika keramiska material innehållande beryllium används i alltifrån datorer och telekomindustrin till stridsflygplan och satelliter [5].

### Beryllium

Kemisk beteckning: Be

Atomnummer: 4

Atomvikt: 9,01218 u

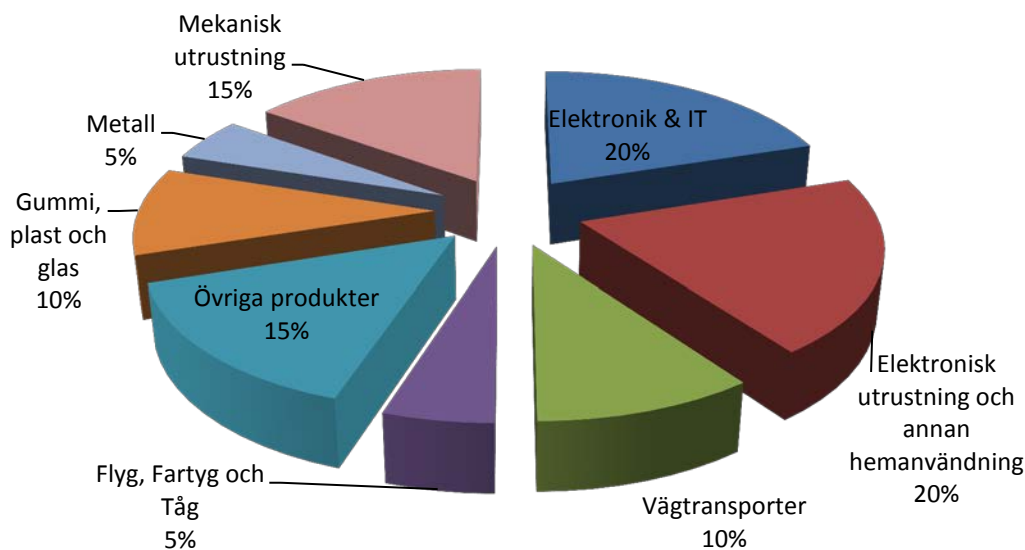
Densitet: 1848 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1551,15 K

Kokpunkt: 3243,15 K



Bildkälla: Wikipedia



Figur 40. Användning av beryllium [3].

Figure 40. The areas of usage for beryllium [3].

### Återvinning

Berylliummetall har en lång livslängd och det tar därför tid innan den kommer till återvinningsledet. Eftersom en del används för satelliter och annan rymdteknik samt för militära ändamål kommer inte heller den delen till återvinning. Enligt olika källor så återvinns 19-30 % av beryllium idag [1, 24]. Beryllium återvinns i första hand från produktionsspill. Beryllium är svårt att ersätta eftersom den höga kostnaden för metallen innebär att den bara används där dess egenskaper verkligen kommer till nytta [5].

## B.3 Gallium, Ga

### Allmänt

Gallium är en mjuk silvrigt vit metall med låg smältpunkt (ca 30°C), ämnet har också den egenskapen att densiteten i flytande form är högre än den i fast form [8]. För närvarande är det någorlunda balans mellan produktion och behov inom Europa men det är inte säkert att det kan bestå i framtiden.

### Förekomst och produktion

Gallium finns företrädesvis tillsammans med aluminium och zink men förekommer även tillsammans med kol, diaspor och germanit. Den genomsnittliga halten i jordskorpan är ca 16 g/ton, och är därmed ungefär lika vanligt som bly [8]. Produktionen sker i stort sett uteslutande som en biprodukt vid aluminium- och zinkframställning. 2012 var primärproduktionen av gallium 273 ton [5]. De största primärproducenterna var Kina, Tyskland, Kazakstan och Ukraina men även Ungern, Japan, Sydkorea och Ryssland hade produktion.

### Gallium

Kemisk beteckning: Ga

Atomnummer: 31

Atomvikt: 69,723 u

Densitet: 5904 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 29,8 °C

Kokpunkt: 2204 °C



Bildkälla: Wikipedia

Koncentrationen i bauxit kan vara upp till 50 ppm och den största delen av reserverna finns i denna typ av mineral. Det är bara en liten del av bauxiten som dock i nuläget innehåller ekonomiskt brytvärda mängder.

### Användning

Den huvudsakliga användningen av gallium sker som en förening med arsenik (GaAs). Denna förening är en halvledare och används bland annat i integrerade kretsar inom försvarsindustrin, högprestanda datorer samt inom telekomindustrin [4]. Föreningen används också exempelvis i LED, laserdioder och solceller. En mindre mängd gallium används inom forskning och speciallegeringar (ca 3 %). Användningen spås öka kraftigt framförallt inom integrerade kretsar och solceller.

### Återvinning

Stora mängder av produktionsspill/skrot från produktionen av GaAs komponenter återvinns och återvinningskapaciteten 2012 uppskattades till 198 ton. Om skillnaden mellan totalproduktionen och primärproduktionen av gallium antas vara den återvunna mängden skulle det innebära att det återvanns 62 ton gallium 2012 [5]. All återvinning sker för närvarande från produktionsspill ("new scrap") och inte från produkter som har kasserats [3]. För närvarande så är det någorlunda balans mellan produktion och behov av gallium inom Europa, men det är inte säkert att detta kan bestå i framtiden. För att trygga behovet inom Europa är det viktigt att försöka öka återvinningen generellt, inte bara från produktionsspill [3].

## B.4 Germanium, Ge

### Allmänt

Germanium är en spröd, gråvit, kristallin halvledarmetall. Ämnet upptäcktes 1886 av Clemens Winkler [8].

### Förekomst och produktion

Halten germanium i jordskorpan är ca 1,5 ppm. Främst finns metallen i germanitfyndigheter men utvinningen av germanium sker i stort sett uteslutande som en biprodukt vid koppar, bly och zinkbrytning. Kina är den dominerande producenten av germanium, se Figur 41. Andra producenter är USA, Ryssland, Frankrike, Tyskland, Italien, Spanien och Storbritannien. De europeiska producenterna är dock sådana som raffinerar metallen ur malm som brutits utanför EU. Enligt USGS så producerades 128 ton globalt år 2012. De kända reserverna av germanium är intimt förknippad med tillgängliga reserver av zink-, bly- och kopparsulfid. Det saknas därför bra data för reserver av germanium [3].

### Germanium

Kemisk beteckning: Ge

Atomnummer: 32

Atomvikt: 72,6 u

Densitet: 5323 kg/m<sup>3</sup>

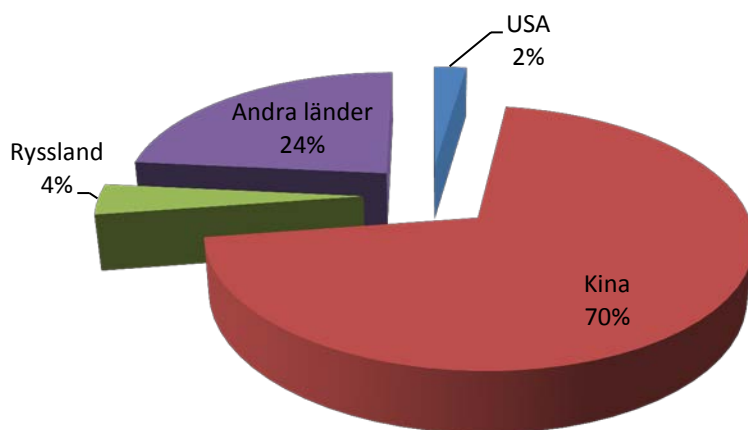
Smältpunkt: 937 °C

Kokpunkt: 2830 °C



Bildkälla: Wikipedia



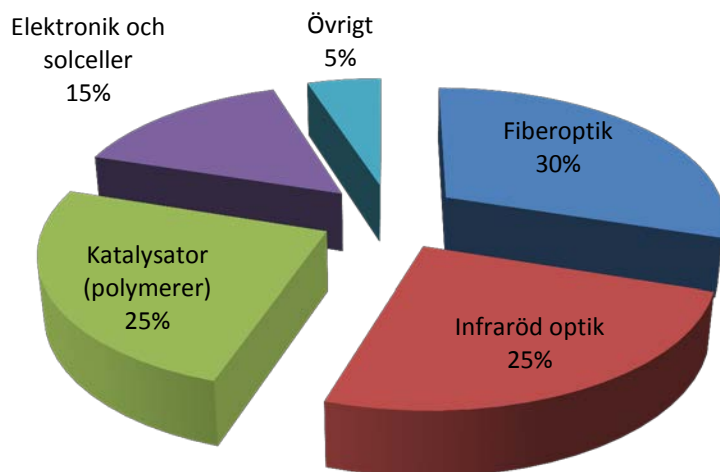


Figur 41. Primärproduktionen av germanium 2012 [5].

Figure 41. The primary production of germanium in 2012 [5].

### Användning

Den främsta användningen av germanium är i optiska material, fiberoptik och infraröd optik, vilka tillsammans står för 55 % av användningen, se Figur 42. När det gäller infraröd optik är försvarsindustrin en stor användare. Germanium används också som katalysator vid produktionen av polyester och syntetiska textilfibrer. Germanium var tidigt en viktig halvledare inom elektronikindustrin, dock minskade användningen i takt med att den ersattes av kisel som var mycket billigare. I takt med att man miniatyriserar elektroniken har efterfrågan på germanium ökat. Den används också i exempelvis LED, mobiltelefoner och solceller. Användningen av germanium spås öka då efterfrågan på exempelvis fiberoptik och solceller förväntas öka kraftigt, dock förutspås även produktionen öka i minst samma takt (beroende på en förväntad ökad brytning av zink).



Figur 42. Användningen av germanium [5].

Figure 42. The areas of usage for germanium [5].



## Återvinning

30 % av den mängd germanium som används i världen beräknas komma från återvinning. Det är främst tillverkningspill. Vid tillverkningen av olika optiska enheter går normalt sett 60 % av den använda germaniumen till spill som sedan återvinns [3]. En ökad återvinning från exempelvis fiberoptik, solceller med mera förväntas.

Möjligheten att byta ut germanium varierar beroende på vilken applikation som avses. I många fall kan man använda kisel istället för germanium, om en viss prestandaförsämring kan accepteras. Germanium är dock det bästa ämnet i hög-frekvenstillämpningar inom elektroniken [3].

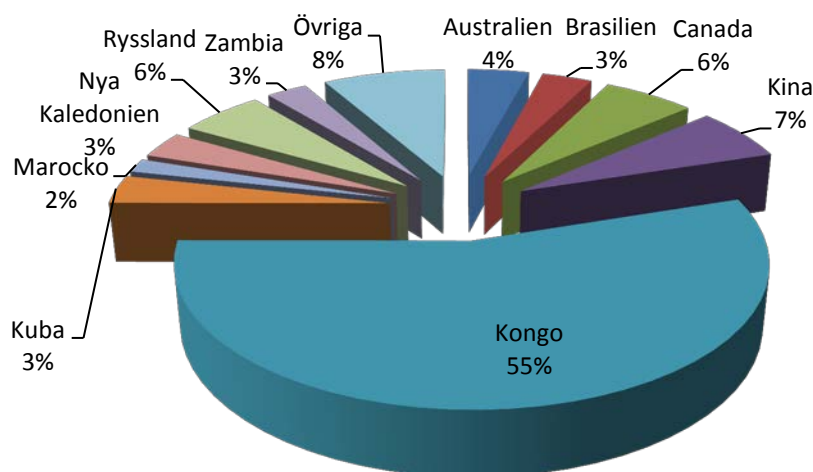
## B.5 Kobolt, Co

### Allmänt

Kobolt är en silvergrå, mycket hård, magnetisk metall med relativt låg ledningsförmåga för både värme och el. Kobolt isolerades första gången av Georg Brandt på 1730-talet [8]. Kobolt var det första grundämne som upptäcktes i Sverige. Namnet har den fått efter ett sagoväsen (berg troll) som man trodde kunde påverka malmen i gruvor. Kobolt är Södermanlands landskapsgrundämne [10].

### Förekomst och produktion

Kobolthalten i jordskorpan är ca 25 ppm och den förekommer i flera vanliga malmer, exempelvis kobaltit och erythrit. Huvudsakligen utvinns den dock som en biprodukt vid koppar och nickelframställning. Världens reserver är i hög grad koncentrerade till centrala Afrika [5], se Figur 43.



Figur 43. Uppskattad primärproduktion av kobolt 2012, totalmängd 110 000 ton [5].

Figure 43. Estimated primary production of cobalt in 2012, total amount 110 000 tons [5].

### Kobolt

Kemisk beteckning: Co

Atomnummer: 27

Atomvikt: 58,9332 u

Densitet: 8900 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1495 °C

Kokpunkt: 2927 °C



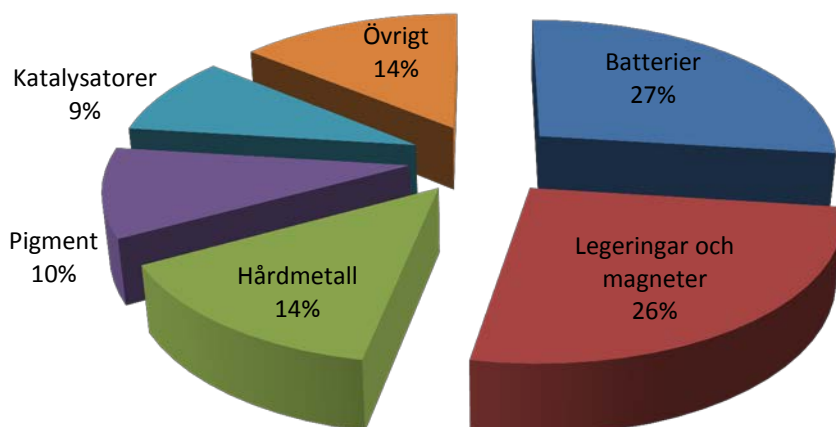
Bildkälla: Wikipedia

## Användning

Den rena metallen har inte så många direkta användningar men däremot används kobolt i olika föreningar inom en rad områden, se Figur 44.

- Uppladdningsbara batterier är idag det största användningsområdet för kobolt. Kobolt förekommer i såväl nickel-kadmium-, nickel-metallhydrid- och litiumjonbatterier.
- Legeringar där koboltens egenskaper utnyttjas för att öka legeringens motståndsförmåga mot såväl termisk-, korrosiv- och mekanisk (slitage) påverkan. Typiska applikationsområden har varit jetmotorer, turbiner, rymdfarkoster, utvalda delar i motorer, kemisk utrustning mm.
- Hårdmetallapplikationer, kobolt används som bindemedel vid tillverkningen av verktyg i karbid eller diamant.
- Kobolt används som katalysator inom petrokemi och plastindustrin.
- Kobolts magnetiska egenskaper utnyttjas i magnetiska legeringar som ska fungera vid höga temperaturer.
- Kobolt används också i form av oxider eller salter som exempelvis färgpigment i keramik, torkmedel i färg och som lim i olika gummiapplikationer.

Användningen av kobolt spås öka fram till 2020. Under 2010 exporterade Sverige 200 ton kobolt och importerade 396 ton [6].



Figur 44. Användningsområden för kobolt [3].

Figure 44. The areas of usage for cobalt [3].

## Återvinning

Återvinning av kobolt har utvecklats som en naturlig följd av en hög prisvolatilitet och att primärresurserna varit koncentrerade till centrala Afrika. Återvinningen av legeringar och exempelvis karbidmaterial sker främst inom respektive sektor och kobolten återvinns då i form av just legeringar eller i olika blandade former. Batterier och katalysatormaterial återvinns dock via koboltproducenterna.

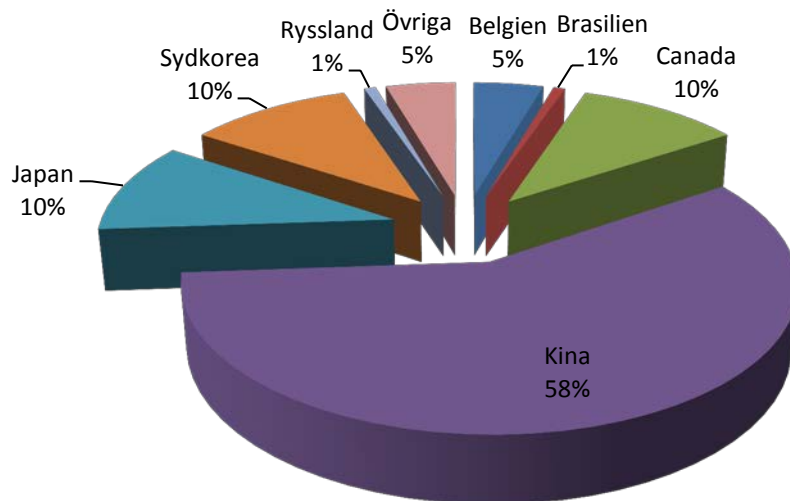
## B.6 Indium, In

### Allmänt

Indium är en mjuk silvergrå metall som upptäcktes 1863 av Ferdinand Reich och Hieronymous Theodor Richter [8].

### Förekomst och produktion

Indium förekommer på många ställen men i låga halter. Den utvinns oftast tillsammans med bly- och zinkproduktion eftersom den bland annat ofta förekommer i sfalerit som är ett bly-zinkmineral. I dessa fyndigheter varierar koncentrationen av indium mellan 1-100 ppm medan genomsnittshalten i jordskorpan är 0,05 ppm. De allra högsta halterna av indium föreligger dock ofta i tenn- och volframmalmer, dock är utvinningen svårare från dessa mineraler så det har varit svårt att få ekonomi i den utvinningen [7]. De länder som raffinerar indium visas i Figur 45.



Figur 45. Mängden indium som raffinerades 2012 - notera att det land indium raffinerar i inte nödvändigtvis är det land i vilket det bryts. Total mängd var 2012 uppskattad till 670 ton [5].

Figure 45. Amount of indium that was refined in 2012 – note that the country where indium is refined, is not necessarily the same as the country where it is mined. Total amount in 2012 was estimated to 670 tons [5].

### Användning

Indiums huvudsakliga användning är i form av indium-tennoxid. Denna förening är genomskinlig och elektriskt ledande vilket har gjort att den blivit väldigt viktig i LCD-skärmar som används i såväl TV, datorer, mobiltelefoner och andra elektroniska produkter [5]. Denna användning står för 74 % av indiumbehovet. Indium används sedan även till exempelvis vindrutor (defrostfunktion), lågtemperaturlegeringar, laserdioder och för att minska korrosion.

### Indium

Kemisk beteckning: Co

Atomnummer: 49

Atomvikt: 114,818 u

Densitet: 7310 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 157 °C

Kokpunkt: 2080 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Återvinning

Vid produktionen av LCD-skärmar är det bara 15-30 % av indium-tennoxiden som fastnar på själva skärmen, resten blir svinn. Av detta uppskattas det idag att drygt 85 % kan återvinnas och återföras som en råvaruresurs. När det gäller återvinning från slutprodukter är den väldigt begränsad och härrör främst från återvinning av LCD-skärmar.

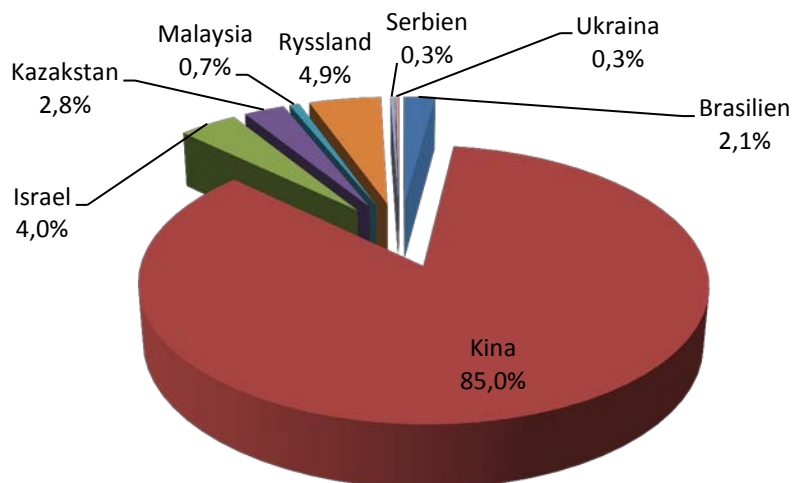
## B.7 Magnesium, Mg

### Allmänt

Magnesium är en lätt, hård, silvervit alkalisk jordartsmetall. Magnesium är bland annat centralatom i klorofyll och utgör oftast 0,3-1% av växternas torrsvikt. Även för djur är magnesium ett väldigt viktigt mineralämne och i en vuxen människa finns 20-30 gram magnesium. Ämnet är Blekinges landskapsgrundämne [10].

### Förekomst och produktion

Magnesium är ett av de vanligaste grundämnena i jordskorpan, det åttonde vanligaste, men förekommer inte i ren metallisk form i naturen. Däremot förekommer magnesium i varierande halt i över 60 mineraler. Kommersiellt är det dock bara dolomit, magnesit, brucit, karnallit och olivin som är av betydelse. Metallen utvinns även ur salt från havsvatten. Det finns stora reserver av de olika mineralerna som magnesium kan utvinnas ur. Kina dominerar i dagsläget marknaden stort [5], se Figur 46. Den totala produktionen uppgick till ca 750 000 ton år 2012, med en fördelning enligt Figur 46.



Figur 46. Den uppskattade primärproduktionen av magnesium 2012. Total mängd 750 000 ton [5].

Figure 46. The estimated production of magnesium in 2012. Total amount: 750 000 tons [5].

### Magnesium

Kemisk beteckning: Mg

Atomnummer: 12

Atomvikt: 24,305 u

Densitet: 1738 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 649 °C

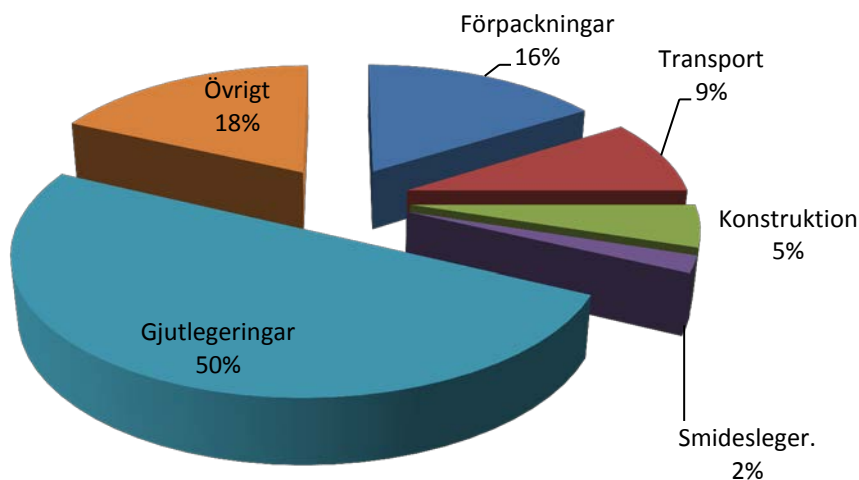
Kokpunkt: 1090 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Användning

Den största andelen magnesium används i legeringar i gjutna material inom bland annat bilindustrin, se Figur 47. Traditionellt har man varit ute efter den låga densitet som man kan få i dessa legeringar, på senare tid har dock även magnesiumlegeringar med mycket hög korrosionsbeständighet tagits fram. Magnesium är också vanligt i legering med aluminium i ”aluminiumburkar”. Magnesium reagerar lätt med svavel vilket gör att det används i järn- och stålproduktion för att rena dessa material från svavelföreningar. Andra användningsområden är vid tillverkning av beryllium, hafnium, uran och zirkonium, som viktig komponent i fyrverkerier och lysraketer och vid tillverkning av lättviktsmaterial inom idrotten. Användningen av magnesium spås fördubblas mellan 2010 och 2020 [3] men produktionen spås också öka i samma takt.



Figur 47. Användningsområden för magnesium [3].

Figure 47. The areas of usage for magnesium [3].

## Återvinning

Det finns stora energivinster med att återvinna magnesium, energiåtgången är cirka 20 gånger högre vid primärproduktionen, vilket också gäller för aluminium. Inom gjuteriindustrin återvinns produktionsspillet. Magnesiumlegeringar är också lämpliga för återvinning och cirka en tredjedel av dessa antas återvinnas. I USA står återvunnen magnesium för 40-50% av den totala magnesiumtillförseln i landet [4]. En uppskattning av EUs arbetsgrupp för kritiska metaller är att 33 % av metallen återvinnas [3].

## B.8 Niob, Nb

### Allmänt

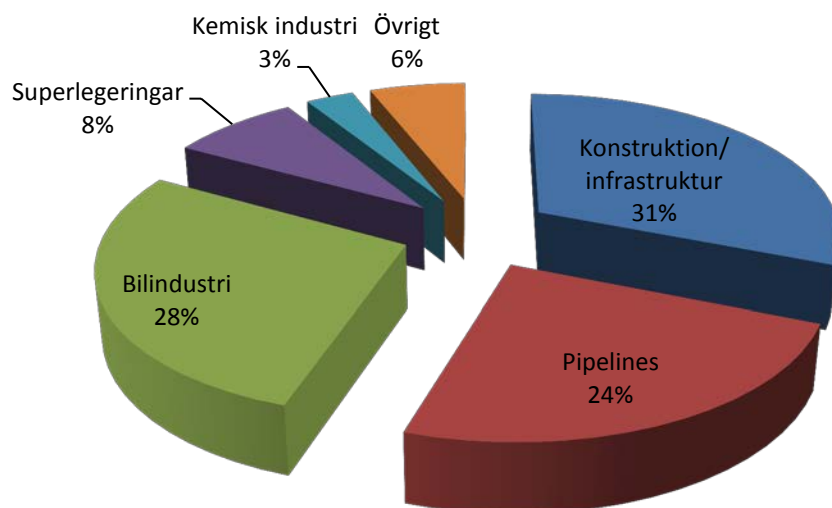
Niob är en ganska mjuk, grå metall. Den upptäcktes 1801 av Charles Hatchett som först döpte den till columbium efter materialet kolumbit som var malmen ämnet hittades i [8].

### Förekomst och produktion

Halten av niob i jordskorpan är i genomsnitt ca 24 ppm och den förekommer i ett 60-tal olika mineraler. Primärt utvinns niob ur mineralerna pyroklor och kolumbit. Brasilien står idag för 91,3 % och Kanada står för 7,3 % av primärproduktionen. Niob förekommer alltid tillsammans med tantal och dessa separeras i en komplex kemisk process [3]. Den totala produktionen år 2012 var ungefär 69 000 ton [5].

### Användning

Huvudanvändningen för niob är inom stålindustrin, se Figur 48. Olika Fe-Nb legeringar utgör ca 10 % av stålproduktionen i världen. De är uppskattade för sin styrka och att de bibehålls även vid högre temperaturer och används bland annat inom byggindustri för såväl byggnader som broar och järnväg. Niob används också för bilchassin, off-shoreplattformar, pipelines och inom olika legeringar i kärnkraftsindustrin och flygindustrin. Andra mindre användningsområden är i smycken, magneter, superledare, termometrar, kondensatorer och katalysatorer. Niob går att ersätta med andra metaller men de produkternas egenskaper kan då bli sämre eller leda till ett högre pris [5].



Figur 48. Användningsområden för niob [1].

Figure 48. The areas of usage for niobium [1].

### Niob

Kemisk beteckning: Nb

Atomnummer: 41

Atomvikt: 92,906 u

Densitet: 8570 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 2477 °C

Kokpunkt: 4744 °C



Bildkälla: Wikipedia



## Återvinning

Huvuddelen av återvinningen av niob sker genom återvinning av stål, EU har uppskattat att drygt 50 % av niob återvinns på detta sätt. Det innebär dock att den sedan inkluderas i lägre materialkvaliteter. I stort sett ingen renframställning av niob verkar ske i återvinningsleden. Enligt USGS så uppskattas återvinningen till cirka 20 % av den årliga konsumtionen [5].

## B.9 Tantal, Ta

### Allmänt

Tantal är en hård grå-blå metall som upptäcktes 1802 av svensken Anders Gustav Ekeberg [8]. Namnet kommer från grekiska mytologins Tantalos. Metallen har den tredje högsta smältpunkten av alla metaller och har mycket bra ledningsförmåga för såväl värme som elektricitet.

### Förekomst och produktion

Tantal förekommer ofta tillsammans med niob, dock är den genomsnittliga halten i jordskorpan bara ca 2 ppm. Tantal förekommer också i tennslag. Australien står för drygt 48 % av produktionen och Brasilien 15,5 %. Andra viktiga producenter är Kongo och Rwanda [3]. Totalt bröts cirka 765 ton tantal 2012 [5]. Tantal är en av de få sällsynta jordartmetaller där produktionen inte domineras av Kina.

### Användning

Den överlägset största användningen av tantal är i kondensatorer där den används i form av metalliskt pulver och trådar, se Figur 49. Tantal används också ofta för medicinska ändamål eftersom den inte anses giftig och den har god kompatibilitet med vävnader, exempelvis används tantal till höftledsimplantat. Andra användningsområden är i superlegeringar som används bland annat i turbinblad, möbler, glas, halvledare och korrosionsbeständiga bultar och muttrar. Tantalkarbid används för att göra hårdmetall för borrar och sågblad. Användningen av tantal spås öka då efterfrågan på kondensatorer ökar med en ökad elektronikanvändning. Tillgången är osäker då en del gruvor har dragit ner eller lagt ner produktionen på grund av för låga priser och det är osäkert hur många av dessa som kan tänkas återuppta produktionen framöver.

### Tantal

Kemisk beteckning: Ta

Atomnummer: 73

Atomvikt: 180,9497 u

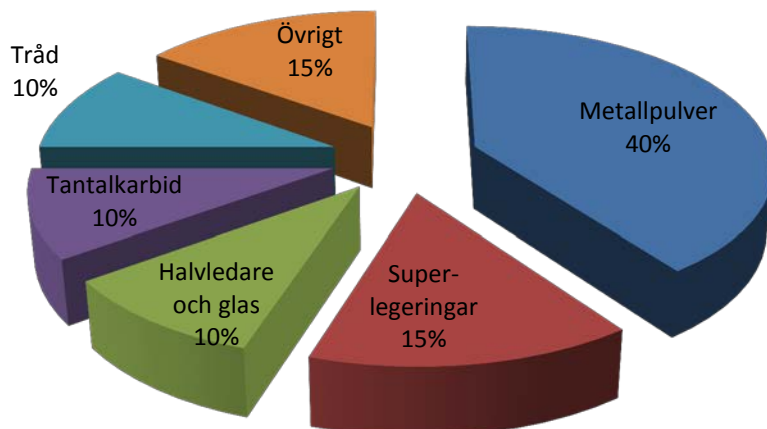
Densitet: 16650 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 3017 °C

Kokpunkt: 5458 °C



Bildkälla: Wikipedia



Figur 49. Användningsområden för tantal år 2007. Notera att metallpulver och tråd huvudsakligen används för produktion av kondensatorer till elektronikindustrin [1].

Figure 49. The areas of usage for tantalum in 2007. Note that metal powder and thread are mainly used for the production of capacitors to the electronics industry [1].

### Återvinning

Återvinningen av tantal sker främst genom att det är produktionsspill som återvinns. Det finns uppgifter om att ca 20 % av den tantal som används är återvunnen. Återvinning från använt material sker främst av olika karbider och superlegeringar, uppgifter om hur mycket som återvinns denna väg varierar mellan 1-9 % [1]. Tantal går att ersätta i många applikationer men funktionen försämras vanligtvis i dessa fall.

## B.10 Volfram, W

### Allmänt

Volfram ("tungsten" på engelska), är en gråvit metall med den högsta smältpunkten av alla metallerna (näst högst av alla grundämnen). Volfram har också en mycket hög densitet. Volfram finns i vissa biomolekyler och är det tyngsta ämne som man vet används av levande organismer [3].

### Förekomst och produktion

Medelkoncentrationen av volfram i jordskorpan är ca 1 ppm, den förekommer inte i metalliskt tillstånd men ingår i drygt 30 olika kända mineraler. Av dessa mineraler är det dock enbart två (wolframit och scheellit) som används för utvinning [3]. Under 2012 bröts ca 73 000 ton volfram och Kina stod för ca 85 % av detta. Andra länder som också bryter volfram är bland annat Ryssland, Österrike, Bolivia, Kanada och Portugal.

### Volfram

Kemisk beteckning: W

Atomnummer: 74

Atomvikt: 183,84 u

Densitet: 19250 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 3422 °C

Kokpunkt: 5555 °C

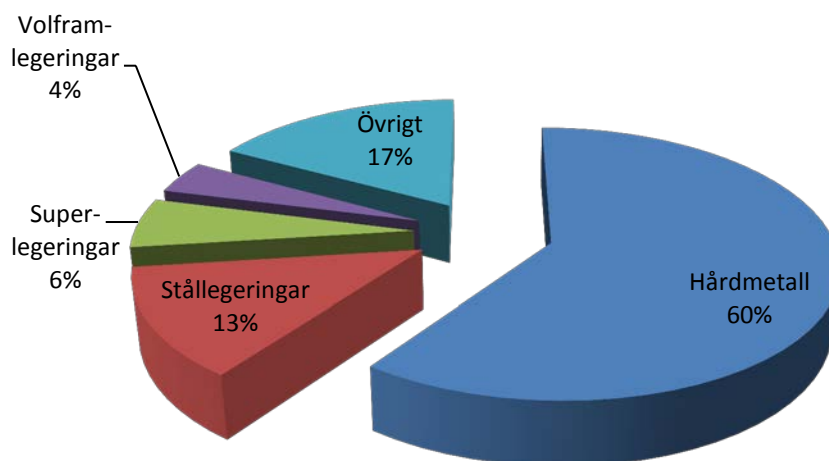


Bildkälla: Wikipedia



## Användning

Volfram har en rad olika användningsområden men det absolut största är i hårdmetaller (i form av volframkarbid), se Figur 50. Dessa metaller används i utrustningar som utsätts för hårt mekaniskt slitage eller höga temperaturer, exempelvis utrustning i gruvdrift, metallframställning och konstruktion. Volfram i form av tråd, elektroder eller kontakter används för belysning, elektriska applikationer och vid svetsning. Högdensitetsapplikationer för användning som vikter eller motvikter är ett annat område för volfram. Det finns en rad andra användningsområden också som inkluderar katalysatorer, oorganiska pigment, högttemperatursmörjmedel, superlegeringar för turbinblad och kylblock [3].



Figur 50. Användningsområden för volfram [3].

Figure 50. The areas of usage for tungsten [3].

## Återvinning

35 till 40 % av den volfram som används i industrin är återvunnen. De höga halterna av volfram i metallskrot jämfört med den naturliga förekomsten gör det mycket intressant med återvinning. Vid återvinningen av volfram återvinns normalt sett även andra värdefulla metaller. Återvinning av volfram från exempelvis glödlampor sker dock inte i någon större utsträckning då det är för små mängder, genomsnittlig vikt på en glödtråd är 30 mg [1].

## B.11 Platinametallerna

### Allmänt

Platinametallerna är en grupp om sex metaller med likartade egenskaper. (PGM – Platina group metals). Dessa metaller är uppdelade i lätta platinametaller som utgörs av rutenium (Ru), rodium (Rh) och palladium (Pd) och de tunga platinametallerna som utgörs av osmium (Os), iridium (Ir) och platinum (Pt). Platinagruppens element har ett antal gemensamma egenskaper, hög densitet, hög smältpunkt, liten termisk utvidgning, god korrosionsresistens, goda elektriska egenskaper samt att de inte oxideras i någon större utsträckning ens vid höga temperaturer.

Rutenium upptäcktes 1844 av Karl Ernst Claus. Metallen är silvervit, spröd och går lätt att mala till ett pulver. Rodium är en silvervit metall. Saltlösningar av rodium är ofta rosa och metallen har fått sitt namn efter grekiskans ord för ros. Ämnet upptäcktes av William Hyde Wollaston ungefär samtidigt som palladium 1802-1804. Palladium är en mjuk och silvervit metall [11]. Palladium är Härjedalens landskapsgrundämne [10].

Osmium är en gråblå hård men spröd metall. Dess densitet är den högsta av de stabila grundämnena. På grund av sin hårdhet, sprödhet och höga smältpunkt är metallen väldigt svår att bearbeta mekaniskt. Ämnet upptäcktes 1803 av Smithson Tennant och William Hyde Wollaston. Ämnet har fått sitt namn efter det grekiska ordet osme för lukt då en av osmiumoxiderna är flyktig och har en karakteristisk lukt [11]. Osmium är det ovanligaste ämnet i jordskorpan, av ej sönnerfallande ämnen, med en genomsnittlig halt av 0,05 ppb [12].

Iridium är en silvervit metall med ett visst gult inslag. Den är hård och spröd men har den högsta korrosionsresistensen av alla metaller. Iridium upptäcktes 1803 av Smithson Tennant och namngavs efter regnbågens gudinna Iris på grund av att iridiums salter har en mängd olika färger. [11].

Platina är en vitgrå ädelmetall som ingår i platinametallerna. De första referenserna i litteraturen till platina är från 1550-talet och hänvisar då till en mystisk metall som bryts i gruvor i Centralamerika. Mer säkra dokumentationer skedde under 1700-talet. Platina har använts av indianerna i Central- och Sydamerika under lång tid.

### Rutenium

Kemisk beteckning: Ru

Atomnummer: 44

Atomvikt: 101,07 u

Densitet: 12 450 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 2334 °C

Kokpunkt: 4150 °C



Bildkälla: Wikipedia

### Rodium

Kemisk beteckning: Rh

Atomnummer: 45

Atomvikt: 102,9055 u

Densitet: 12 410 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1964 °C

Kokpunkt: 3695 °C

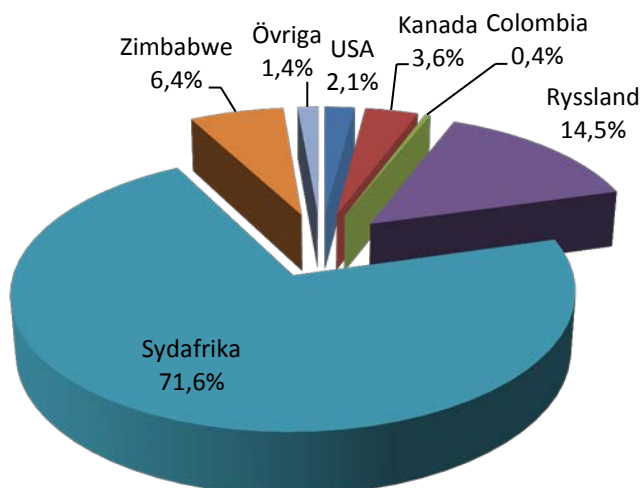


Bildkälla: Wikipedia

## Förekomst och produktion.

Platinametallerna är generellt mycket sällsynta och den genomsnittliga halten i jordskorpan av platina är 5 ppb (0,005 ppm). Sydafrika dominerar produktionen av platina i världen, se Figur 51. Platinagruppens element förekommer normalt sett tillsammans där platina och palladium är de dominerande elementen. Ofta är fyndigheterna också associerade med förekomsten av nickel, koppar och guld. Fyndigheterna i USA, Sydafrika och Zimbabwe bryts för platinametallerna medan i övriga länder är det oftast en biprodukt vid exempelvis utvinning av nickel.[3],[5]

Inom EU så finns det en liten produktion av platina i Polen och Finland, de står för 0,01 promille respektive 0,39 % av världsproduktionen år 2012. Polen står också för 0,1 promille av världens palladiumproduktion [3]. Utvecklingen av efterfrågan på vissa platinametaller de senaste åren visas i Figur 52.



Figur 51. Primärproduktionen av platina 2012 total utvinning 179 ton [5].

Figure 51. The primary production of platinum in 2012 total mining: 179 tons [5].

## Palladium

Kemisk beteckning: Pd

Atomnummer: 46

Atomvikt: 106,42 u

Densitet: 12 023 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1554,9 °C

Kokpunkt: 2963 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Osmium

Kemisk beteckning: Os

Atomnummer: 76

Atomvikt: 190,23 u

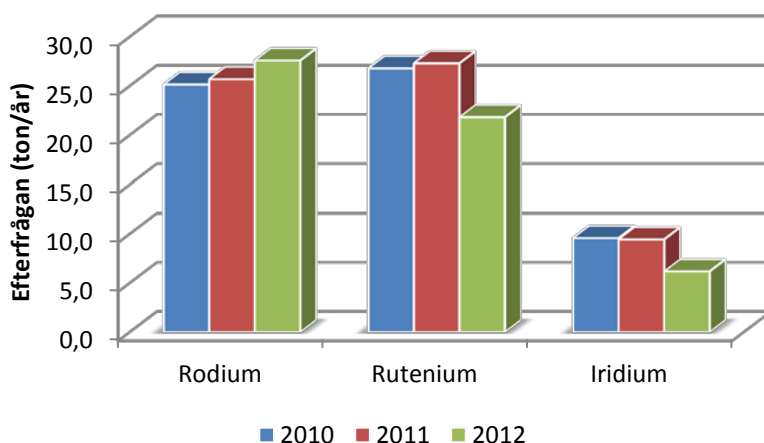
Densitet: 22 590 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 3033 °C

Kokpunkt: 5012 °C



Bildkälla: Wikipedia



Figur 52. Efterfrågan av rodium, rutenium och iridium de senaste åren [13].

Figure 52. Request for rhodium, ruthenium and iridium the last years [13].

### Användning

Det största användningsområdet för platinametallerna idag är i bilkatalysatorer (Pt, Pd, Rh) och partikelfilter, se Figur 53. Ett annat stort användningsområde är smycken. En betydande andel platina och palladium används också i rena investeringssyften likt guld [3].

Rhodium används också i LCD-glas, vissa kemikalier och elektriska applikationer. Ca 3 ton produceras årligen globalt [2].

Rutenium används främst inom elektronikindustrin där det bland annat används i hårddiskar, resistorer och plasmaskärmar. Det spås att rutenium i framtiden kommer att användas mer som katalysator i bränsleceller. Ca 120 kg produceras årligen [2].

Iridium används som katalysator i olika processer, i spetsen på tändstift samt i vissa andra elektroniksammanhang. Kanada är den dominerande producenten och cirka 3 ton produceras årligen [2].

Osmium används i legeringar med platina och iridium och används i pennspetsar, elektriska kontakter, glödtrådar i lampor och i medicinska implantat. Ca 60 kg produceras årligen globalt [2].

Palladium används i telekommunikationsutrustning och elektriska reläer, katalysatorer, för produktion av vitguld (genom att blanda guld och Pd) mm. Årsproduktionen är cirka 24 ton globalt och produceras tillsammans med utvinningen av platina, nickel, koppar och kvicksilver. [2].

Användningen av platinametallerna spås öka och det är inte säkert att primärproduktionen ökar i samma takt [1].

### Iridium

Kemisk beteckning: Ir

Atomnummer: 77

Atomvikt: 192,217 u

Densitet: 22 560 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 2466 °C

Kokpunkt: 4428 °C



Bildkälla: Wikipedia

### Platina

Kemisk beteckning: Pt

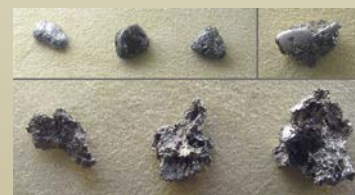
Atomnummer: 78

Atomvikt: 195,078 u

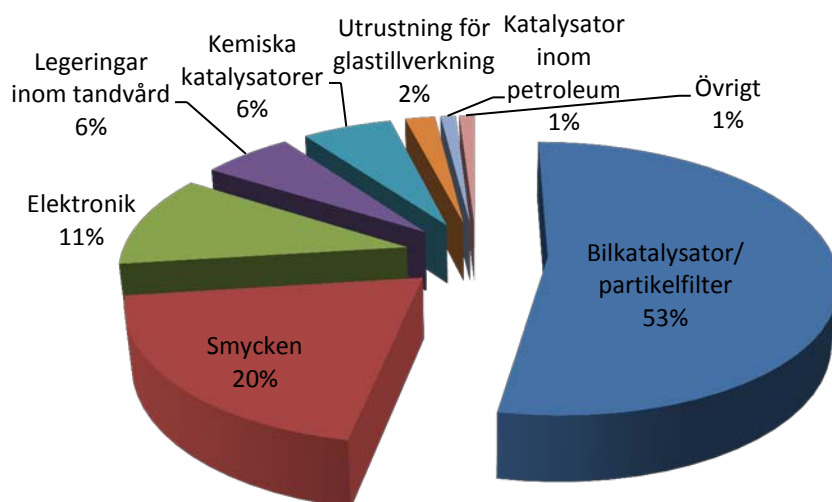
Densitet: 21 450 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1772 °C

Kokpunkt: 3827 °C



Bildkälla: Wikipedia



Figur 53. Användningsområdena för platinametallerna [3].

Figure 53. The areas of usage for the platinum metals [3].

### Återvinning

På grund av sitt höga värde är återvinningen av platinametaller stor, främst gäller det dock i form av produktionsspill/industriell användning av metallerna (processkatalysatorer och användningen inom glasindustrin). Det beräknas att 90 % av det som används i dessa sektorer återvinns och de mängder som köps in av dessa sektorer är för att täcka produktionsökningar samt det bortfall som blir vid återvinningen. För konsumentskrot (smycken, bilcatalysatorer mm) är återvinningen lägre, det uppskattas att 50-60 % av platinametallerna i bilcatalysatorerna återvinns (för EU är denna siffra betydligt lägre på grund av export av gamla bilar till länder/regioner utan fungerande återvinningssystem). Den stora utmaningen inom återvinningen är insamlingen då själva återvinningsprocessen i sig har en effektivitet på >95 % [3].

## B.12 Sällsynta jordartsmetaller

Sällsynta jordartsmetaller är ett samlingsnamn för en grupp metaller med likartade kemiska egenskaper. Definitionen på vilka metaller som ingår varierar men vanligtvis räknas skandium, yttrium, lantan, cerium, praseodym, neodym, prometium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium och lutetium till denna grupp [8].

### Förekomst och produktion

Trots namnet är flera av elementen relativt vanliga i jordskorpan och cerium är ungefär lika vanligt som koppar, och tulium är mer förekommande än guld och platina. De sällsynta jordartsmetallerna förekommer i stort sett alltid tillsammans i mineraler/malmer och bryts

### Yttrium

Kemisk beteckning: Y

Atomnummer: 39

Atomvikt: 88,90585 u

Densitet: 4 472 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1526 °C

Kokpunkt: 3336 °C



Bildkälla: Wikipedia

### Scandium

Kemisk beteckning: Sc

Atomnummer: 21

Atomvikt: 44,955912 u

Densitet: 2 985 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 541 °C

Kokpunkt: 2 836 °C



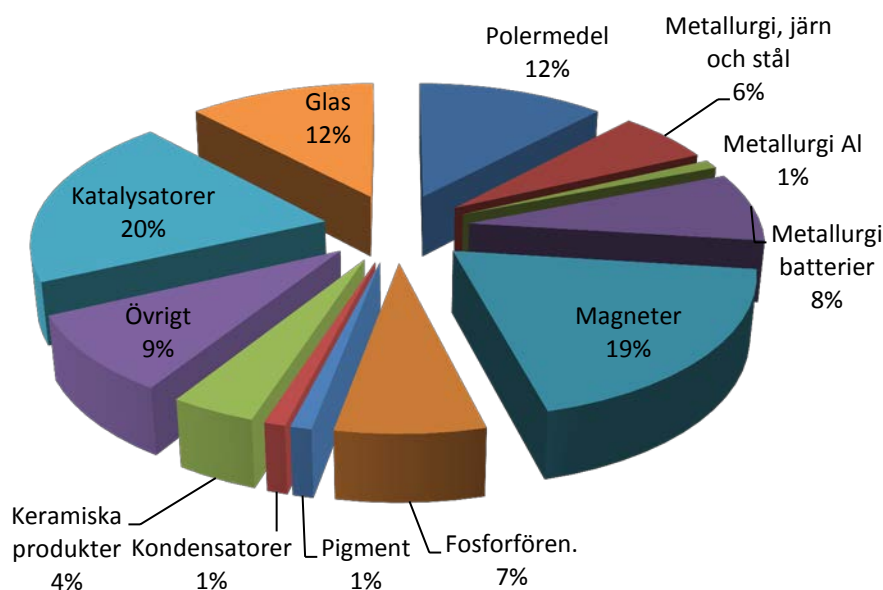
Bildkälla: Wikipedia



därför tillsammans. Deras likhet när det gäller kemiska och fysikaliska egenskaper gör att det är ganska komplicerat och dyrt att renframställa respektive ämne. De mineraler som oftast bryts för utvinning av dessa metaller är monazit och bastnäsit. En del av jordartsmetallerna utvinns även ur uranmalm. Kina har ungefär en tredjedel av världens reserver av sällsynta jordartsmetaller men är totalt dominerande när det gäller produktionen (86 % 2011, 95 % 2012). Andra länder som också bryter metallerna är USA, Australien, Brasilien, Indien och Malaysia [3],[5].

### Användning

Även om de sällsynta jordartsmetallerna är likartade kemiskt och fysikaliskt har de också unika egenskaper vilket gör dem lämpliga för olika applikationer och där det inte alltid fungerar att substituera dem med andra sällsynta jordartsmetaller. De viktigaste användningsområdena och fördelningen mellan dessa ses i Figur 54.



Figur 54. Användningsområdena för de sällsynta jordartsmetallerna [3].

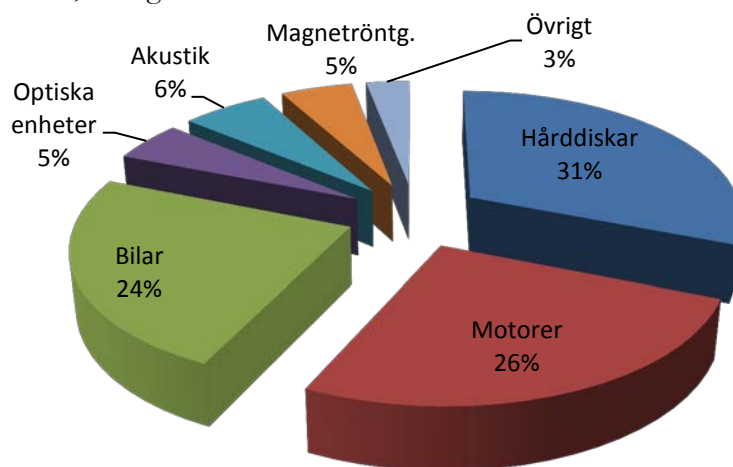
Figure 54. The areas of usage for the rare earth elements [3].

Inom glasindustrin har cerium, lantan och praseodym traditionellt använts som polermedel [1] för exempelvis LCD och plasmaskärmar, optiska linser och andra precisionskomponenter både inom optik och inom elektronik. Cerium, lantan, neodym, yttrium och praseodym har också använts i additiv i glas, bland annat i datorskärmar för att skydda glaset mot katodstrålen, denna användning har dock minskat kraftigt i takt med att de platta skärmarna tagit över marknaden. Idag används de främst i små linser med höga krav på prestandan.

I nickelmetallhybridbatterier är de sällsynta jordartsmetallerna en viktig beståndsdel, på grund av kostnaden för renframställningen av de enskilda metallerna används ofta dock en blandning av metallerna som har likartad prestanda som en renare mix skulle kunna ha.

Det största enskilda användningsområdet för metallerna är i katalysatorer av olika slag. Katalysatorer i petroleumkrackning är en stor förbrukare och då främst av lantan och cerium men bilkatalysatorer är ett annat stort användningsområde[1],[3].

De starkaste permanentmagneterna är baserade på sällsynta jordartsmetaller, det är främst två typer som används inom industrin och det är neodym-järn-bormagneter och samarium-koboltmagneter. Neodym-magneterna är den starkaste varianten och också den mest använda. För att anpassa magneterna efter applikation så innehåller de ofta även exempelvis dysprosium, praseodym, gadolinium och terbium. Användningen av magneterna är bland annat för vindturbiner, elmotorer, hårddiskar, högtalare, mikrofoner och hörlurar, se Figur 55.



Figur 55. Användning av neodymmagneter [1].

Figure 55. The areas of usage for neodymium magnets [1].

Andra användningsområden för de sällsynta jordartsmetallerna är i färgpigment, olika legeringar för såväl järn/stål som aluminium samt i keramer och kondensatorer. Användningen av de sällsynta jordartsmetallerna spås öka ganska kraftigt de närmaste åren [1].

### Återvinning

Det sker en väldigt liten återvinning av sällsynta jordartsmetaller idag, ca 1 % beräknas återvinnas och det är då främst från permanentmagneter [5].

Nedan följer specifik information om de sällsynta jordartsmetallerna i den utsträckning som det går att få tag på.

### Lantan

Kemisk beteckning: La

Atomnummer: 57

Atomvikt: 138,90547 u

Densitet: 6 162 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 920 °C

Kokpunkt: 3464 °C



Bildkälla: Wikipedia

### Cerium

Kemisk beteckning: Ce

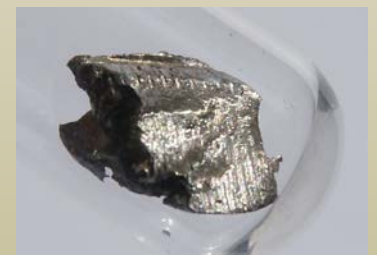
Atomnummer: 58

Atomvikt: 140,116 u

Densitet: 6 770 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 795 °C

Kokpunkt: 3 443 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Yttrium, Y

Yttrium är en mjuk silverfärgad metall. Metallen skyddas normalt sett av ett tunt lager oxid och är då relativt stabil. Om metallen däremot exponeras för luft direkt vid temperaturer över 400 °C kan den antändas. Ämnet hittades första gången i mineraler utanför Ytterby i Sverige [2]. Yttrium är upplands landskapsgrundämne [10].

Yttriumföreningar används blanda annat som katalysator vid polymerisation av etylen, den kan också utgöra elektrod i vissa typer av tändstift. Yttriumföreningar används också som bas där exempelvis europium eller andra lantanoider tillsätts. Detta har exempelvis utnyttjats för att få fram den röda färgen i bildrör i TV-apparater. Ett annat användningsområde för yttrium är i produktionen av syntetiska ädelstenar av olika slag. Supraledare, superlegeringar av olika slag, syresensorer i bilmotorer, temperatursensorer, verktyg med högt motstånd mot korrosion och mekaniskt slitage, som anod i vissa bränsleceller, laser och som komponent i mikrovågsradar är andra exempel på tillämpningar där yttrium har en funktion [3],[5]. Små mängder, främst från laserkristaller och syntetiska ädelstenar, återvinns [5].

## Skandium, Sc

Skandium är en silvervit metall som upptäcktes 1879 av Lars Fredrik Nilsson. Ämnet framställdes för första gången i sin metalliska form 1937 och det dröjde till 70-talet innan man hittade något användningsområde för ämnet.

Skandium förekommer i nivån i jordskorpan med cirka 16 ppm, vilket kan jämföras med kobolt (cirka 20 ppm) [2]. Skandium är således inte speciellt sällsynt men det är ont om brytvärda fyndigheter. Tillgången är dock riklig globalt sett om man jämför den med behovet [24, 43]. År 2003 bröts bara Skandium i tre gruvor i världen; Ukraina, Kina och Ryssland. Den totala produktionen och användningen av Skandium uppskattas till mindre än 10 ton per år. Enligt en källa är nuvarande produktion av skandium 2 ton per år varav en stor del tas från ryska kalla-kriget-lager. Den största delen av metallen produceras som skandiumoxid, endast en liten andel som ren metall. Det finns två kända fyndigheter i världen (Norge och Madagaskar) med mineral med högt skandiuminnehåll (upp till 45 %), men dessa bryts inte för närvarande. Den största delen av skandium produceras som biprodukter när andra mineraler produceras [15],[16].

Den främsta användningen för skandium är i aluminiumlegeringar för extrema tillämpningar såsom flygindustrin och sportutrustning. Andra användningsområden är högintensitets metallhalidlampor, lasrar, metallurgisk forskning, anoder i bränsleceller och som spårämne för oljekällor [3],[17].

## Praseodym

Kemisk beteckning: Pr

Atomnummer: 59

Atomvikt: 140,90765 u

Densitet: 6 770 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 935 °C

Kokpunkt: 3520 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Neodym

Kemisk beteckning: Nd

Atomnummer: 60

Atomvikt: 144,242 u

Densitet: 7 010 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1024 °C

Kokpunkt: 3 074 °C



Bildkälla: Wikipedia



Ingen återvinning av skandium sker i dagsläget [5]. En bidragande orsak till detta är förmodligen att det fortfarande finns upplagrad skandium i Ryssland från kalla-kriget-tiden, som kommer ut på nuvarande marknad, samt att tillgången är god i förhållande till behovet.

### **Lantan, La**

Lantan är en mjuk, formbar silvervit metall som upptäcktes 1839 av Carl Gustaf Mosander [8]. Metallen oxiderar snabbt vid kontakt med luft.

Lantan är inte speciellt sällsynt även om den tillhör gruppen sällsynta jordartsmetaller. Den har en medelkoncentration på 32 ppm i jordskorpan och jämförbart med bly och tenn. Årsproduktionen globalt är ca 12500 ton [17]. Framställningsprocessen från gruva till metall är dock dyr, tidskrävande och komplicerad [18].

Den första tillämpningen för lantan var i manteln för gaslyktor. Mer moderna tillämpningsområden är bland annat nickelmetall-hydridbatterier (ca 10-15 kg lantan i batterierna i en Prius) [3], lagring av vätgas, katodmaterial i vakuumtuber, glas i fiberoptik, detektorer för neutroner och gammastrålning, linser till kameror och teleskop, svetselektroder och i diverse katalysatorer.

### **Cerium, Ce**

Cerium är en mjuk, formbar silverfärgad metall som lätt oxideras i luft. Ämnet upptäcktes 1803 av Martin Heinrich Klaproth, Jöns Jakob Berzelius och Wilhelm Hisinger. Cerium är den metall i gruppen som förekommer rikligast, med en medelkoncentration på 46 ppm i jordskorpan. Produktionen globalt är ca 24 000 ton [17].

Cerium är en viktig komponent i bilkatalysatorer, ceriumoxid tillsätts också till diesel. Ett annat användningsområde är inom glasindustrin där cerium både används som en ingrediens i sig men också för att reglera färgen i glas [17]. I glas har cerium också den egenskapen att den selektivt absorberar UV-ljus. För att polera optik av olika slag så används ofta ceriumoxid.

### **Praseodym, Pr**

Praseodym upptäcktes tillsammans med Neodym av österrikaren Carl Auer von Welsbach 1885 [8]. Metallen är en mjuk formbar och silvrig. Salterna av praseodym är i vattenlösning gulgröna.

Praseodym förekommer i låga koncentrationer, ca 9,5 ppm i jordskorpan [19]. Cirka 2500 ton produceras årligen [17].

Praseodym används exempelvis tillsammans med magnesium i legeringar i flygplansmotorer. Andra användningsområden är som färgpigment i glas och glasyr, additiv i skyddsglasögon vid svetsning [17], som färgpigment i syntetiska ädelstenar, eldstål i gaständare och som del i belysning typiskt inom filmindustrin. Den igår också ofta som en komponent i permanentmagneter.

## Neodym, Nd

Neodym är en ljus silverfärgad metall som oxideras snabbt i luft. Oxiden lossnar efter ett tag från metallen och exponerar på så sätt metallen för ytterligare oxidation. Ämnet upptäcktes samtidigt som praseodym av österrikaren Carl Auer von Welsbach 1885. Efter cerium är neodym den vanligaste av de sällsynta jordartsmetallerna, med en genomsnittskoncentration av 38 ppm [17]. Cirka 7000 ton producerades 2004 [8].

Neodym är en viktig komponent i permanentmagneter och en neodymmagnet kan lyfta motsvarande 1000 gånger sin egen vikt. En del av de magnetiska egenskaperna minskar vid högre temperaturer och neodymmagneter har också en tendens att rosta. Magneterna används bland annat i vindkraftverk, elmotorer, hårddiskar, högtalare och mikrofoner. Neodym är också viktig i laserapplikationer, som färgpigment i glas (vilket också var det första kommersiella användningsområdet), i skyddsglasögon vid svetsning och i olika glasapplikationer där man vill filtrera bort gult-grönt ljus [17]. Ett exempel på det sistnämnda är att neodym kan användas i backspeglar för att minska bländningseffekten av bakomvarande bilar vid mörkerkörning.

En liten mängd neodym återvinns då man återvinner permanentmagneter [3].

## Samarium, Sm

Samarium är en silverfärgad metall med densitet och hårdhet liknande den zink har. Den oxideras långsamt i luft vid rumstemperatur men självantänder vid temperaturer runt 150 °C. Ämnet upptäcktes troligen av fransmannen Paul Émile Lecoq de Boisbaudran 1879 [8] (dock publicerades upptäckt av ämnet av flera olika personer under senare delen av 1800-talet).

Samarium finns i de vanliga mineralerna för sällsynta jordartsmetaller, nämligen monazit och bastnäsit. Årproduktionen globalt är ca 700 ton [2].

Ett av de viktigaste användningsområdena för samarium är i samarium-koboltmagneter. De är svagare än neodymmagneterna men har fördelen att de bibehåller sin magnetism längre och vid högre temperaturer. De används bland annat i små elmotorer, hörlurar, elgitarrer och elbasar. Ett annat viktigt användningsområde för samarium är som katalysator och kemisk reagent, exempelvis för nedbrytning av PCB [2]. Om man tillsätter samarium till glas så förbättras glasets absorption av infrarött ljus.

## Samarium

Kemisk beteckning: Sm

Atomnummer: 62

Atomvikt: 150,36 u

Densitet: 7 520 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 072 °C

Kokpunkt: 1 794 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Europium

Kemisk beteckning: Eu

Atomnummer: 63

Atomvikt: 151,964 u

Densitet: 5 264 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 826 °C

Kokpunkt: 1 529 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Europium, Eu

Europium är en formbar metall med en hårdhet jämförbar med bly. Ämnet upptäcktes av Eugene Anatole Demarcay 1901 [17]. Europium är den mest reaktiva av de sällsynta jordartsmetallerna och oxideras snabbt i luft.

Europium utvinns ur monazit och bastnäsit och är en av de minst förekommande av de sällsynta jordartsmetallerna. År 2010 producerades endast 390 ton metalloxid och 270 ton ren metall [17].

Användningsområdena är ganska begränsade med fokus på att utnyttja ämnets fosforescens. Europium är ett av de ämnen som har använts för att genererar den röda färgen i traditionella TV-apparater. Den används som tillsatsämne i glas vid olika laser och optoelektroniska tillämpningar. Den används också i vissa färgade lampor [2], [17].

## Gadolinium, Gd

Gadolinium är en formbar silvervit metall som upptäcktes 1880 av Jean Charles Galissard de Maignac [2].

Genomsnittskoncentrationen i jordskorpan är låg, bara ca 6 ppm. Global produktion är cirka 7500 ton per år [17].

Ämnet har inte några storskaliga applikationer men används för att förbättra hanterbarhet och resistens i järn och kromlegeringar. Det krävs en ganska liten inblandning av gadolinium för att få dessa förbättringar. Gadolinium används också i kontrastvätska vid magnetröntgen, generera grön färg i TV-apparater och vid tillverkningen av CD-skivor [2], [17].

## Terbium, Tb

Terbium är en mjuk, formbar silvervit metall. Ämnet upptäcktes 1843 av Carl Gustaf Mosander.

Terbium utvinns från ett flertal mineraler men förekommer i mycket låga koncentrationer i dessa. Den genomsnittliga koncentrationen har uppskattats till cirka 1 ppm i jordskorpan [18]. Årsproduktionen globalt är ganska liten, bara 10 ton [2].

Terbium används exempelvis som stabilisator i bränsleceller [17]. Det största användningsområdet är dock tillsammans med europium i trikromatiska ljuskällor.

## Dysprosium, Dy

Dysprosium är en mjuk silvervit metall som upptäcktes 1886 av Paul Émile Lecoq de Boisbaudran [8]. Koncentrationen av dysprosium i jordskorpan är ca 5,2 mg/kg och i havsvatten är den 0,9 ng/L [18]. Dysprosium används tillsammans med bland annat vanadin i olika lasermaterial. Ett annat område är inom

## Dysprosium

Kemisk beteckning: Dy

Atomnummer: 66

Atomvikt: 162,5 u

Densitet: 8 540 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 407 °C

Kokpunkt: 2 562 °C



Bildkälla: Wikipedia

## Holmium

Kemisk beteckning: Ho

Atomnummer: 67

Atomvikt: 164,93032 u

Densitet: 8 790 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 461 °C

Kokpunkt: 2 720 °C



Bildkälla: Wikipedia

kärnkraften där det används i kontrollstavarna i reaktorn. De magnetiska egenskaperna hos dysprosium utnyttjas också i exempelvis hårddiskar.

Ungefär 100 ton av dysprosium produceras varje år varav 99 % kommer från Kina. USAs energidepartement (DOE) förutspår en brist redan 2015 beroende på att tillgången är begränsad och den är svår att ersätta i många av applikationerna. Speciellt bekymmersamt kommer det att bli inom området förnyelsebar energi, där metallen är en viktig komponent [20]. Mellan åren 2003 och 2010 steg priset på dysprosium med en faktor 20 [21].

### Holmium, Ho

Holmium är en relativt mjuk och formbar silverfärgad metall. Den upptäcktes 1878 av Marc Delafontaine och Jacques-Louis Soret [8]. Namnet kommer från det latinska namnet på Stockholm (Holmia).

Den globala produktionen av Holmium är ca 10 ton per år och medelkoncentrationen i jordskorpan är ca 1,4 ppm. Metallen utvinns oftast tillsammans med Yttrium [8].

Holmium är det starkast magnetiska grundämnet och används för att generera konstgjorda magnetfält. Den används också i kontrollstavar i kärnkraftsreaktorer på grund av sin förmåga att absorbera neutroner. Holmium används också för lasertillämpningar inom exempelvis medicin och tandvård. Ämnet används också som färgpigment i glas och konstgjorda ädelstenar [2], [17].

### Erbium, Er

Erbium är en mjuk, formbar silvervit metall som inte oxideras lika lätt som flertalet av de andra sällsynta jordartsmetallerna. Den upptäcktes 1842 av Carl Gustaf Moasander [8].

Erbium är det 45:e vanligaste ämnet i jordskorpan med en koncentration på cirka 3-4 ppm. Ungefär 500 ton produceras i världen per år [18]. Xenotime and euxenite är de två vanligaste mineralerna som erbium utvinns ur [8].

Erbium används bland annat som filter vid fotografering, i legering med vanadin, färgpigment i glas och konstgjorda ädelstenar, kryokylare, samt inom optisk kommunikation och laserapplikationer inom exempelvis laserkirurgi [2], [17].

### Tulium, Tm

Tulium är en lättarbetad silvergrå metall. Ämnet upptäcktes av svensken Per Teodor Cleve 1879 [8].

Tulium är den näst mest sällsynta av lantaniderna med en medelkoncentration av 0,5 ppm i jordskorpan. Ca 50 ton av

### Erbium

Kemisk beteckning: Er

Atomnummer: 68

Atomvikt: 167,26 u

Densitet: 9000 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 522 °C

Kokpunkt: 2 510 °C



Bildkälla: Wikipedia

### Tulium

Kemisk beteckning: Tm

Atomnummer: 69

Atomvikt: 168,93 u

Densitet: 9 321 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 545 °C

Kokpunkt: 1 947 °C



Bildkälla: Wikipedia

tuliumoxid producerar årligen i världen. Gadolinit är den mineral som innehåller högst halter av tulium [22].

Tulium används som lasermedium och används såväl för militära som medicinska ändamål. Tulium används också som strålningskälla i bärbara röntgenapparater och i supraledare och keramiska magneter som används i mikrovågstillämpningar [2], [17].

### Ytterbium, Yb

Ytterbium är en mjuk, formbar, silvervit metall som upptäcktes 1878 av Jean Charles Galissard de Marignac. Den är döpt efter Ytterby i Sverige (vilket ytterligare tre metaller är) [8]. Metallen oxiderar relativt långsamt i luft.

Ytterbium återfinns, i likhet med många andra lantanoider, i mineralet monazit. Den globala årsproduktionen är cirka 50 ton, och medelkoncentrationen i jordskorpan cirka 3 ppm [8].

Ytterbium har jämfört med andra lantanoider ganska få tillämpningar. Ytterbium används likt tulium som strålkälla i bärbara röntgenapparater. Som tillsats i rostfritt stål har ytterbium förbättrat de mekaniska egenskaperna på stålet [2],[17]. Andra användningsområden är i lasrar, optiska urverk och mätutrustning för att studera deformationer orsakade av jordbävningar eller explosioner.

### Lutetium, Lu

Lutetium är en silvervit metall med god korrosionsbeständighet i torr luft. Korrosionsbeständigheten försämras dock kraftigt i fuktig luft. Ämnet upptäcktes av ett antal personer oberoende av varandra 1907 men Georges Urbain har tillskrivits upptäckten då han publicerades först. Ämnet utvinns främst från monazit som innehåller ungefär 1 ppm lutetium [8].

Lutetium är en av de mest sällsynta av lantanoiderna med en medelkoncentration i jordskorpan på bara 0,5 ppm. Årsproduktionen globalt är ca 10 ton och den är en av de dyraste lantanoiderna [8]. Monazit och bastänit är de två vanligaste mineralerna som lutetium utvinns ur.

Lutetium används i katalysatorer i petroleumkrackning [17]. Andra områden är i LED lampor, konstgjorda ädelstenar, vissa detektorer samt i vissa medicinska tillämpningar.

### Ytterbium

Kemisk beteckning: Yb

Atomnummer: 70

Atomvikt: 173,04 u

Densitet: 6 570 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 824 °C

Kokpunkt: 1 194 °C



Bildkälla: Wikipedia

### Lutetium

Kemisk beteckning: Lu

Atomnummer: 71

Atomvikt: 174,97 u

Densitet: 9 841 kg/m<sup>3</sup>

Smältpunkt: 1 663 °C

Kokpunkt: 3 395 °C



Bildkälla: Wikipedia

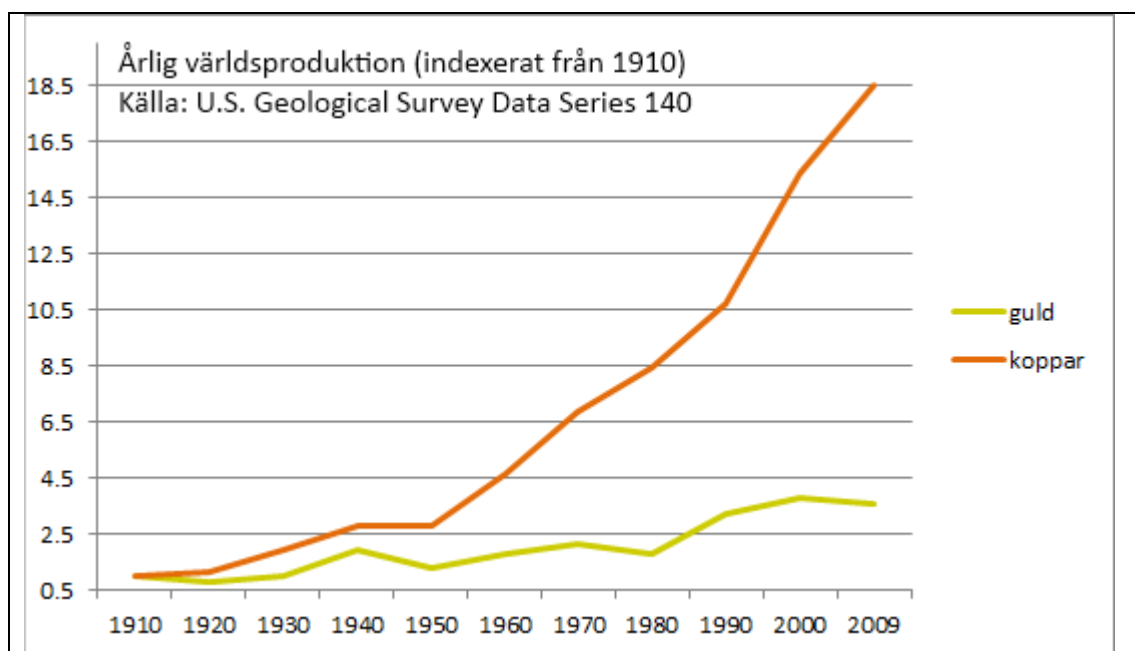
## B.13 Guld, Au

### Allmänt

Guld är en mjuk gulaktig metall och är utan tvekan den mest välkända av de sällsynta metallerna [8]. Anledningen till detta är att guld i flera årtusenden har haft flera användningsområden, där de främsta varit handel och för smyckestillverkning.

### Förekomst och produktion

Guld förekommer i jordskorpan i en medelhalt på endast 0,004 ppm (4 ppb), vilket innebär att guld är en av de mest sällsynta metallerna på jorden. Trots detta har man under mycket lång tid producerat guld. En intressant sak med produktion av guld är att årsproduktionen har ökat under den industriella revolutionen, men inte alls i samma omfattning som produktionen av andra för industrialismen betydelsefulla metaller. En anledning till detta är att det har blivit allt svårare att hitta guldfyndigheter med hög guldhalt. De mest ekonomiska fyndigheterna verkar således redan ha funnits och utvunnits. Den årliga produktionen av guld i världen ligger ungefär på 2500 ton per år, se Figur 56, och de senaste åren har produktionsökningar i vissa länder kompenseras av produktionsminskningar i andra länder [5]. Olika uppskattningar har gjorts av den totala mängden guld i världen och dessa hamnar på ca 150 000 ton, vilket ungefär motsvarar 2 små guldringar per person. Av denna mängd har ungefär 100 000 utvunnits hittills.



Figur 56. Produktion av guld har inte visat samma ökning de senaste hundra åren som andra viktiga metaller t ex koppar [23].

Figure 56. The production of gold hasn't shown the same increase the last hundred years compared to other important metals like copper.

### Användning

Guld har många användningsområden på grund av sina egenskaper. Guld oxideras knappt av syre, vilket gör den mycket beständig jämfört med många andra metaller. Guld är extremt smidbart och lätt att bearbeta. Ett gram guld kan dras ut till en tråd av längden 285



meter. De klassiska användningsområdena är för smykestillverkning och som betalningsmedel [2]. Idag används guld också i stor utsträckning i elektronikindustrin, bl a för plätering av kontakter.

### **Återvinning**

På grund av guldets höga värde så är återvinningen omfattande i världen. Det svenska företaget Boliden producerar ca 15 ton guld per år varav 10 ton kommer från elektronikåtervinning och 5 ton från gruvorna [24].

## **B.14 Silver, Ag**

Silver är en metall som i likhet med guld är mycket välkänd eftersom den historiskt använts till smyckesproduktion. Silver är en av de åtta ädelmetallerna, de andra är guld och de sex platinametallerna. Silver har högst konduktivitet och termisk ledningsförmåga av alla metaller. Silverföreningar är kraftigt giftigt för biologiska organismer.

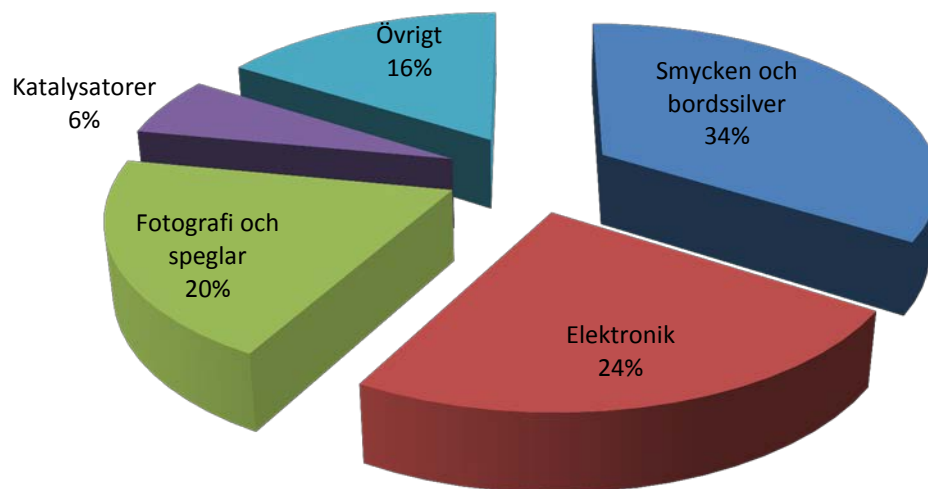
### **Förekomst och produktion**

Medelhalten av silver i jordens mantel är ca 10 g silver per ton, dvs 10 ppm. Den årliga produktionen av silver i världen har succesivt ökat och var 24 000 ton 2012 [5], vilket är ungefär 10 gånger mer än guldproduktionen. Den beräknade reserven ligger på cirka 500 000 ton, vilket med nuvarande utvinningstakt bara motsvarar 20 års produktion.

Silver utvinns främst i form av en bi-produkt då koppar, bly och zink utvinns. Inom Europa få är Polen en betydelsefull producent som står för ca 40 % av EUs årliga behov, med en produktion på drygt 1000 ton per år. Även Sverige (Boliden) har en betydelsefull produktion på ca 500 ton/år.

### **Användning**

Silver är extremt användbart och används t ex till smycken, elektronik, speglar, katalysatorer och mycket annat [5]. Figur 57 nedan anger en ungefärlig fördelning av användningsområdena. Spekulation om framtida användning handlar om hur mycket silver som behövs inom solenergiindustrin för att tillverka solpaneler, och i vilken utsträckning silver kan användas inom sårvårdsprodukter.



Figur 57. Användningsområden för silver [3]

Figure 57. The areas of usage for silver [3].

### Återvinning

Återvinningen av silver varierar mycket mellan olika användningsområden för silver. Lättast att återvinna silver är från smycken, mynt, fotoapplikationer och katalysatorer. Inom WEEE-sektorn är det betydligt svårare [3].

Utbytbarheten för silver är stor, men eftersom silver är den metall med störst ledningsförmåga och värmekonduktivitet så kan viss prestandaförsämring förväntas.

## B.15 Koppär, Cu

Koppär rankas som nummer tre, i massa räknat, av de metaller som används inom industrin, följt av järn och aluminium. Koppär är en utomordentligt viktig metall ur samhällsynpunkt med många viktiga tillämpningar.

### Förekomst och produktion

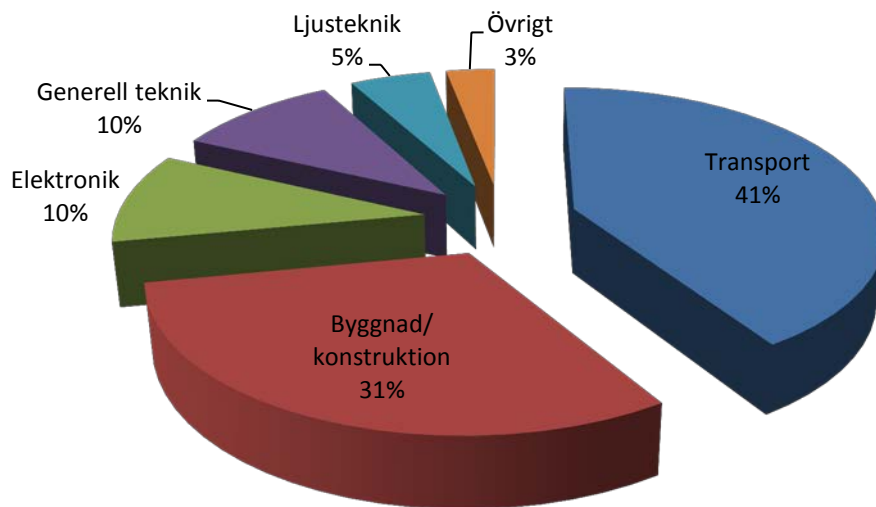
Förekomsten av koppär är störst i Latinamerika, men betydelsefulla fyndigheter finns också inom EU i Polen, Bulgarien, Portugal och Sverige. Globalt är produktionen mycket snedfördelad, eftersom tre länder står för mer än 50 % av produktionen. EU importerar ungefär hälften av sitt behov av koppär för närvarande [3].

### Användning

Användningsområdet för koppär är enormt stort. De viktigaste tillämpningarna framgår av Figur 58 nedan. Området "Transport" innebär koppär till fordon, en modern bil innehåller ca 28 kg koppär. "Byggnad/konstruktion" innebär att koppär använts mycket inom



byggsektorn för t ex elsystem, vattenledningssystem och takläggning. Området ”Elektronik” är också viktigt eftersom koppar används inom elektronikindustrin.



Figur 58. Användningsområden för koppar [3].

Figure 58. The areas of usage for copper [3].

### Återvinning

Återvinningen av koppar är omfattande, t ex för koppar som använts till elsystem i form av begagnade kablar. Koppar är också relativt enkelt att återvinna.

## B.16 Zink, Zn

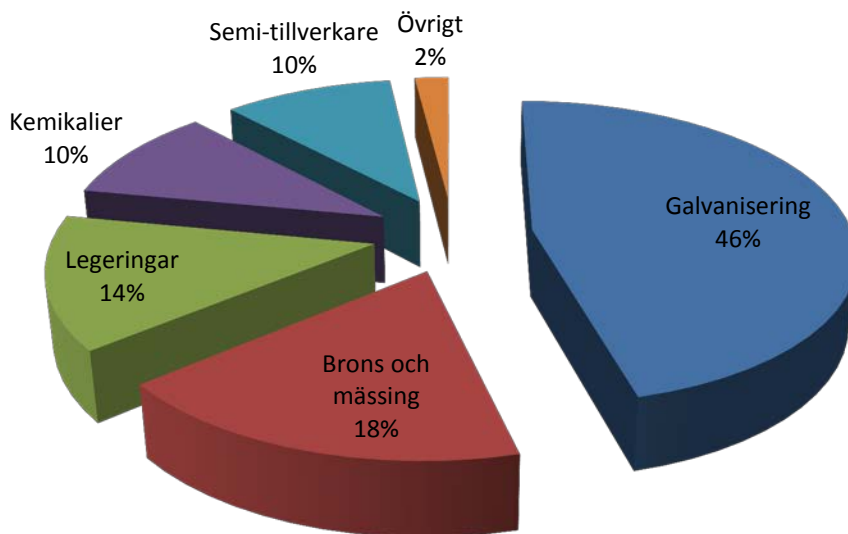
Zink är en mycket vanlig metall som förekommer nästan överallt i biosfären, även inne i djur och människor. Zink är en essentiell metall nödvändig för allt liv. I ren form är den blåvit och spröd, men förekommer oftast som förening med något annat ämne.

### Förekomst och produktion

Det genomsnittliga innehållet i jordskorpan är 75 ppm, dvs metallen är mycket vanlig. Nästan all zink utvinns ur mineralet Zinkblände, en zinksulfid. Zink utvinns i fler än 50 av världens länder och inom Europa så är det främst Irland, Sverige och Polen som är viktiga källor.

### Användning

Zink har väldigt många olika användningsområden, vilket framgår av Figur 59 nedan. Ett mycket viktigt område är korrosionsskydd av stål [3].



Figur 59. Användningsområden för zink [3].

Figure 59. The areas of usage for zinc [3].

### Återvinning

Zink är en metall som återvinns i varierande utsträckning. Den tillgängliga metallen för återvinning varierar mycket beroende på att en del tillämpningar har mycket lång livslängd och därmed är inte metallen tillgänglig för återvinning förrän efter en mycket lång tid. Återvinningsprocesserna för zink har successivt förbättrats över åren [3].

## C Metallpriser

Eftersom metallpriserna rör sig med konjunkturer har prisuppgifter med lite olika tidshorisonter valts. Att den längsta horisonten blev två år berodde på att det var det längsta den databasen vi använt hade statistik för sällsynta jordartsmetaller.

*Tabell 13. Priser för metallerna undersökta i detta projekt. Priserna är uppdelade i ett dagspris medel för de senaste 6 månaderna samt medel för 2 år. Alla uppgifter är hämtade från metalprices.com [25] om inget annat anges.*

*Table 13. Prices of the metals investigated in this study. The prices are divided into a spot price, an average over 6 months and an average over 2 years. Unless otherwise stated the data is collected from metalprices.com [25].*

Ämne	Beteckning	Renhet %	11:e oktober 2013		12:e april–11:e oktober 2013		oktober 2011 – oktober 2013	
			Pris kSEK/ton	Kurs US\$/SEK	Pris kSEK/ton	Kurs (medel) US\$/SEK	Pris kSEK/ton	Kurs (medel) US\$/SEK
<b>Aluminium</b>	Al	100	11,8	0,1545	11,8	0,1527	13,1	0,1502
<b>Antimon</b>	Sb	99,65	67,8	0,1545	67,1	0,1525	81,0	0,1501
<b>Beryllium</b>	Be	98-99	7 160	0,1545	7 250	0,1520	6 970	0,1497
<b>Cerium</b>	Ce	99	66,3	0,1545	73,4	0,1520	166	0,1497
<b>Cerium Misch Metal</b>	Ce + La	Ce: 65 La: 35	49,8	0,1545	58,1	0,1520	103	0,1497
<b>Ceriumoxid</b>	CeO <sub>2</sub>	99,5- 99,9	28,6	0,1545	31,7	0,1520	74,8	0,1497
<b>Dysprosium</b>	Dy	99	3 390	0,1545	3 440	0,1520	6 440	0,1497
<b>Dysprosiumoxid</b>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,5- 99,9	2 120	0,1545	1 930	0,1520	3 910	0,1497
<b>Erbium</b>	Er	*	443	0,1545	356	0,1520	536	0,1497
<b>Erbiumoxid</b>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,5- 99,9	387	0,1545	312	0,1520	469	0,1497
<b>Europium</b>	Eu	*	6 020	0,1545	5 420	0,1520	9 500	0,1497
<b>Eurpoiumoxid</b>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,95- 99,99	5 200	0,1545	4 680	0,1520	8 210	0,1497
<b>Gadolinium</b>	Gd	*	232	0,1545	189	0,1520	195	0,1497
<b>Gadoliniumoxid</b>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,5- 99,9	201	0,1545	164	0,1520	170	0,1497
<b>Gallium</b>	Ga	99,99	1 690	0,1545	1 760	0,1520	2 300	0,1497
<b>Germanium</b>	Ge	i.u.	12 200	0,1545	12 200	0,1520	10 400	0,1492
<b>Guld</b>	Au	100	267 000	0,1545	285 000	0,1527	339 000	0,1500
<b>Holmium [26]</b>	Ho	i.u.	55 700	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Indium</b>	In	99,99	4 400	0,1545	3 750	0,1525	3 630	0,1501
<b>Iridium</b>	Ir	100	125 000	0,1545	183 000	0,1527	217 000	0,1500
<b>Kobolt</b>	Co	100	178	0,1545	184	0,1527	189	0,1502
<b>Koppar</b>	Cu	100	46,1	0,1545	46,5	0,1527	51,2	0,1502
<b>Lantan</b>	La	99	57,3	0,1545	63,9	0,1520	113	0,1497
<b>Lantanoxid</b>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,5-	29,2	0,1545	31,4	0,1520	72,5	0,1497

Ämne	Beteckning	Renhet %	11:e oktober 2013		12:e april–11:e oktober 2013		oktober 2011 – oktober 2013	
			Pris kSEK/ton	Kurs US\$/SEK	Pris kSEK/ton	Kurs (medel) US\$/SEK	Pris kSEK/ton	Kurs (medel) US\$/SEK
		99,9						
<b>Lutetium [26]</b>	Lu	i.u.	2 200 000	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Magnesium</b>	Mg	99,9	18,0	0,1545	18,5	0,1525	20,5	0,1499
<b>Neodym</b>	Nd	99,0-99,9	472	0,1545	431	0,1520	681	0,1497
<b>Neodymoxid</b>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,0-99,9	374	0,1545	330	0,1520	516	0,1497
<b>Niob</b>	Nb	98-99	875	0,1545	887	0,1520	892	0,1497
<b>Osmium [26]</b>	Os	i.u.	498 000	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Palladium</b>	Pd	100	147 000	0,1545	151 000	0,1527	144 000	0,1500
<b>Platina</b>	Pt	100	288 000	0,1545	305 000	0,1527	328 000	0,1500
<b>Praseodym</b>	Pr	96-99	636	0,1545	521	0,1520	674	0,1497
<b>Praseodymoxid</b>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	99,0-99,9	604	0,1545	466	0,1520	514	0,1497
<b>Rodium</b>	Rh	100	206 000	0,1545	219 000	0,1527	266 000	0,1500
<b>Rutenium</b>	Ru	99,9	11 900	0,1545	16 500	0,1525	21 900	0,1501
<b>Samarium</b>	Sm	*	28,3	0,1545	38,7	0,1520	79,3	0,1497
<b>Samariumoxid</b>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,5-99,9	24,4	0,1545	33,4	0,1520	68,4	0,1497
<b>Silver</b>	Ag	100	4 480	0,1545	4 610	0,1527	6 140	0,1500
<b>Skandium [27]</b>	Sc	99,9	100 000	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Tantal</b>	Ta	scrap	3 380	0,1545	3 410	0,1522	3 500	0,1505
<b>Tantaloxid</b>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30-35	1 530	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Terbium</b>	Tb	99,9	5 200	0,1545	6 130	0,1520	9 900	0,1497
<b>Terbiumoxid</b>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	99,95-99,99	4 400	0,1545	3 810	0,1520	6 500	0,1497
<b>Titan</b>	Ti	90	133	0,1545	141	0,1528	157	0,1507
<b>Tulium [26]</b>	Tm	i.u.	453 000	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Volfram</b>	W	99,5-99,95	371	0,1545	379	0,1520	370	0,1497
<b>Ytterbium [26]</b>	Yb	i.u.	90 600	0,1545	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.
<b>Yttrium</b>	Y	99,9-99,95	297	0,1545	330	0,1520	463	0,1497
<b>Yttriumoxid</b>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,995-99,999	84,8	0,1545	77,7	0,1520	159	0,1497
<b>Zink</b>	Zn	100	12,1	0,1545	12,1	0,1527	12,8	0,1502

\*Priserna har räknats fram genom att utgå från priset på motsvarande oxid.

## D Resultat av de kemiska analyserna

### D.1 Halter kritiska metaller i flygaska från rosteranläggningar

Tabell 14. Resultaten av de kemiska analyserna från flygaskan på rosterpannorna. Resultaten presenterade som medelvärde av två replikat. I de fall skillnaden varit stor mellan replikaten redovisas båda värdena.

Table 14. The results from the chemical analysis of fly ash from grate fired boilers. The results are presented as average values of two replicates. In the case of a large difference between the replicates, both values are presented.

Analyt	Enhet	Sysav	Umeå	Borlänge	Uddevalla	Jönköping	Linköping	Renova
<b>Be</b>	mg/kg	0,71	0,77	0,23	0,83	0,29	0,5	0,61
<b>Mg</b>	mg/kg	16000	18000	6400	16000	9600	10000	13000
<b>Co</b>	mg/kg	40	52	15	45	18	23	29
<b>Ga</b>	mg/kg	12	9	4,9	10	4,2	8,3	13
<b>Ge</b>	mg/kg	2,6	1,5	1,1	2	1,3	1,7	4,2
<b>In</b>	mg/kg	<4	<3	<2	<3	<2	<3	<7
<b>Sb</b>	mg/kg	1500	690	510	1000	770	1100	1400
<b>Nb</b>	mg/kg	14	14	3,2	17	5,2	6,8	13
<b>Ta</b>	mg/kg	1,4	1,2	1,3	1,6	0,8	0,89	2
<b>W</b>	mg/kg	11	16	131	13	5	11	15
<b>Ru</b>	mg/kg	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,04	<0,015
<b>Rh</b>	mg/kg	<0,07	<0,06	<0,02	<0,04	<0,03	<0,04	<0,04
<b>Pd</b>	mg/kg	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
<b>Ir</b>	mg/kg	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007
<b>Pt</b>	mg/kg	<0,2	<0,1	<0,04	<0,2	<0,08	<0,08	<0,2
<b>Ag</b>	mg/kg	26	22	14	15	15	19	34
<b>Au</b>	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
<b>Sc</b>	mg/kg	3,1	3,6	1,2	3,6	1,6	1,8	2,6
<b>Y</b>	mg/kg	12	14	6,2	12	8	7,2	9,2
<b>La</b>	mg/kg	16	15	4,7	16	8,2	11	15
<b>Ce</b>	mg/kg	28	28	8,6	29	14	19	25
<b>Pr</b>	mg/kg	3,7	3	0,98	3	1,7	2	2,5
<b>Nd</b>	mg/kg	14	13	3,8	11	6,7	7,9	10
<b>Sm</b>	mg/kg	1,6	1,8	0,64	1,9	1,1	1,4	1,5
<b>Eu</b>	mg/kg	0,62	0,6	0,22	0,57	0,32	0,33	0,48
<b>Gd</b>	mg/kg	1,3	1,5	0,63	1,6	1,2	1,2	1,7
<b>Tb</b>	mg/kg	0,47	0,36	0,13	0,38	0,32	0,25	0,38
<b>Dy</b>	mg/kg	1,3	1,4	0,68	1,5	1,1	1	1,3
<b>Ho</b>	mg/kg	0,25	0,25	0,14	0,3	0,2	0,2	0,23
<b>Er</b>	mg/kg	0,76	0,87	0,4	0,96	0,6	0,62	0,76
<b>Tm</b>	mg/kg	0,12	0,12	0,065	0,15	0,088	0,073	0,11
<b>Yb</b>	mg/kg	0,77	0,72	0,36	0,91	0,53	0,57	0,68
<b>Lu</b>	mg/kg	0,12	0,11	0,076	0,16	0,075	0,069	0,092
<b>P</b>	vikt-%	0,51	0,61	0,13	0,61	0,26	0,28	0,54
<b>Al</b>	vikt-%	3,8	3,8	0,75	3,9	1,6	2	3,2
<b>Cu</b>	vikt-%	0,2	0,12	0,071	0,1	0,12	0,13	0,17
<b>Zn</b>	vikt-%	3,1	1,6	0,96	1,8	1,3	1,8	4,1

## D.2 Halter kritiska metaller i flygaska från fb-anläggningar

Tabell 15. Resultaten av de kemiska analyserna från flygaskan på fb-pannorna. Resultaten presenterade som medelvärde av två replikat. I de fall skillnaden varit stor mellan replikaten redovisas båda värdena.

Table 15. The results from the chemical analysis of fly ash from fluidized bed boilers. The results are presented as average values of two replicates. In the case of a large difference between the replicates, both values are presented.

Analyt	Enhet	EON	Borås <sup>1</sup>	Fortum Flygaska	Fortum Tomdrag	Fortum Överhettare
Be	mg/kg	0,96	1	0,92	1,1	0,96
Mg	mg/kg	16000	14000	17000	17000	15000
Co	mg/kg	42	30	57	55	40
Ga	mg/kg	14	11	12	14	12
Ge	mg/kg	0,87	0,91	1,2	1,3	1,3
In	mg/kg	<0,7	<0,8	<2	<2	<0,9
Sb	mg/kg	390	250	330	300	290
Nb	mg/kg	14	14	14	13	14
Ta	mg/kg	1,8	1,7	2,9	1,5	1,4
W	mg/kg	22	16	14	10	10
Ru	mg/kg	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Rh	mg/kg	<0,04	<0,04	<0,05	<0,05	<0,04
Pd	mg/kg	<5	<5	<5	<5	<5
Ir	mg/kg	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007
Pt	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,09
Ag	mg/kg	76	14	31	16	18
Au	mg/kg	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Sc	mg/kg	4,2	3,8	4	4,7	4,8
Y	mg/kg	13	13	16	14	15
La	mg/kg	20	18	22	23	21
Ce	mg/kg	36	33	39	40	39
Pr	mg/kg	4	4	4,1	4,6	4,2
Nd	mg/kg	15	15	15	16	15
Sm	mg/kg	2,5	2,4	2,3	2,7	2,5
Eu	mg/kg	0,73	0,58	0,68	0,72	0,72
Gd	mg/kg	2,1	2,6	2	2	2
Tb	mg/kg	0,45	0,4	0,63	0,52	0,47
Dy	mg/kg	1,8	1,9	1,9	2,1	2
Ho	mg/kg	0,35	0,38	0,33	0,39	0,39
Er	mg/kg	1,1	1,4	1,1	1,4	1,3
Tm	mg/kg	0,15	0,21	0,14	0,19	0,2
Yb	mg/kg	1	1,1	1,1	1,2	1,4
Lu	mg/kg	0,15	0,19	0,13	0,17	0,21
P	vikt-%	0,49	0,83	0,19	0,14	0,15
Al	vikt-%	8,4	6,4	7,5	7,2	6,2
Cu	vikt-%	0,46	0,39	0,49	0,33	0,35
Zn	vikt-%	0,8	0,51	0,94	0,72	0,67

<sup>1</sup> Blandning av 7 delar cyklonaska och 3 delar filteraska

### D.3 Halter kritiska metaller i bottenaska från rosteranläggningar

Tabell 16. Resultaten av de kemiska analyserna på bottenaskan från rosterpannorna. Resultaten presenterade som medelvärde av två replikat. I de fall skillnaden varit stor mellan replikaten redovisas båda värdena.

Table 16. The results from the chemical analysis of bottom ash from grate fired boilers. The results are presented as average values of two replicates. In the case of a large difference between the replicates, both values are presented.

Analyt	Enhet	Sysav	Umeå	Borlänge	Uddevalla	Jönköping	Linköping	Renova
Be	mg/kg	1,1	1,2	1,2	1,2	0,99	1,3	1,2
Mg	mg/kg	12000	14000	14000	14000	15000	13000	13000
Co	mg/kg	40	65	40	28	57	47	40
Ga	mg/kg	15	10	9,7	10	9,9	18	12
Ge	mg/kg	1,4	1,1	1,3	0,97	1,3	1,3	1
In	mg/kg	<0,9	<0,9	<1	<0,7	<1	<0,8	<2
Sb	mg/kg	140	90	92	50	170	85	71
Nb	mg/kg	13	11	15	16	13	14	12
Ta	mg/kg	1,1	1	1,7	1,3	2,1	1,6	1,2
W	mg/kg	8,9	15	117	6	22	20	8,6
Ru	mg/kg	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Rh	mg/kg	<0,2	<0,09	<0,1	<0,09	<0,07	<0,02	<0,04
Pd	mg/kg	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ir	mg/kg	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007
Pt	mg/kg	<0,15	<0,2	<0,3	<0,2	<0,2	<0,09	<0,2
Ag	mg/kg	15	6,3	5,5	3,5	8,8	5,4	8
Au	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5 och 2,0	0,5 och <0,5	<0,5
Sc	mg/kg	4,3	4,2	4,9	4,6	4,3	4,9	4,4
Y	mg/kg	13	11	13	13	14	13	14
La	mg/kg	24	17	21	21	18	22	19
Ce	mg/kg	48	38	42	40	38	51	43
Pr	mg/kg	5	3,6	4,3	4,7	3,8	7	4,9
Nd	mg/kg	18	18	16	17	14	26	18
Sm	mg/kg	2,7	2	2,7	2,5	2,2	3,2	2,4
Eu	mg/kg	0,74	0,58	0,58	0,65	0,55	0,74	0,74
Gd	mg/kg	3,3	1,5	2,2	2,2	2	3,5	2,4
Tb	mg/kg	0,6	0,42	0,53	0,48	0,46	0,56	0,52
Dy	mg/kg	2,1	1,9	2,1	2,4	1,9	2,5	3,4
Ho	mg/kg	0,41	0,31	0,42	0,42	0,61	0,48	0,42
Er	mg/kg	1,9	1,7	1,9	1,8	1,5	2,6	1,9
Tm	mg/kg	0,17	0,15	0,21	0,21	0,19	0,19	0,2
Yb	mg/kg	1,3	0,96	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3
Lu	mg/kg	0,18	0,13	0,21	0,2	0,19	0,2	0,18
P	vikt-%	0,33	0,51	0,6	0,41	0,53	0,38	0,35
Al	vikt-%	5,7	6,1	5,6	5,4	5,7	5,7	5,2 och 10
Cu	vikt-%	1,2 och 0,41	5,2 och 0,79	3,1 och 0,66	0,36 och 3,5	1,2 och 0,64	0,25 och 0,71	0,35 och 0,37
Zn	vikt-%	0,4	0,45	0,37	0,38	0,44	0,38	0,46
Fukthalt*	vikt-%	10	14	7,3	11	13	2,6	8,9

\*Torkat vid 105°C

## D.4 Halter kritiska metaller i bottenaska från fb-anläggningar

Tabell 17. Resultaten av de kemiska analyserna på bottenaskan från fb-pannorna. Resultaten presenterade som medelvärde av två replikat. I de fall skillnaden varit stor mellan replikaten redovisas båda värdena.

Table 17. The results from the chemical analysis of fly ash from fluidized bed boilers. The results are presented as average values of two replicates. In the case of a large difference between the replicates, both values are presented.

Analyt	Enhet	EON	Borås	Fortum
Be	mg/kg	1,8	2,2	1,8
Mg	mg/kg	10000	10000	10000
Co	mg/kg	26	23	27 och 80
Ga	mg/kg	12	13	17
Ge	mg/kg	1,4	1,5	1,6
In	mg/kg	<0,6	<0,5	<0,5
Sb	mg/kg	270	180	180
Nb	mg/kg	11	11	9,4
Ta	mg/kg	1,7	1,1	1,6
W	mg/kg	9,1	11	5,5 och 67
Ru	mg/kg	<0,015	<0,015	<0,015
Rh	mg/kg	<0,04	<0,05	<0,03
Pd	mg/kg	<5	<5	<5
Ir	mg/kg	<0,007	<0,007	<0,007
Pt	mg/kg	<0,1	<0,2	<0,15
Ag	mg/kg	51	2,9	7,2
Au	mg/kg	<0,5	<0,5	7,0 och 0,5
Sc	mg/kg	5	5,6	5,6
Y	mg/kg	14	16	15
La	mg/kg	25	24	25
Ce	mg/kg	55	54	62
Pr	mg/kg	5,7	6	6,1
Nd	mg/kg	20	24	24
Sm	mg/kg	3,4	3,6	3,8
Eu	mg/kg	0,61	0,67	0,81
Gd	mg/kg	2,4	2,8	3,3
Tb	mg/kg	0,42	0,51	0,51
Dy	mg/kg	2,3	2,9	2,6
Ho	mg/kg	0,48	0,56	0,51
Er	mg/kg	2,5	2,8	2,8
Tm	mg/kg	0,2	0,25	0,21
Yb	mg/kg	1,4	1,8	1,6
Lu	mg/kg	0,2	0,27	0,23
P	vikt-%	0,18	0,33	0,076
Al	vikt-%	4,7	5,7	5,5
Cu	vikt-%	0,41 och 0,42	0,82 och 0,52	0,36 och 0,52
Zn	vikt-%	0,3	0,21	0,28
Fukthalt*	vikt-%	0,42	2,6	0,12

\*Torkat vid 105°C



## D.5 Halter av kritiska metaller i olika fraktioner av Renovas bottenaska

Tabell 18. Resultaten av de kemiska analyserna från fraktioneringen av Renovas bottenaska. Resultaten presenterade som medelvärde av två replikat. I de fall skillnaden varit stor mellan replikaten redovisas båda värdena.

Table 18. The results from the chemical analysis of different size fractions of bottom ash. The results are presented as average values of two replicates. In the case of a large difference between the replicates, both values are presented.

Analyt	Enhet	Fraktion <5,6 mm	Fraktion 5,6-16 mm	Fraktion >16 mm
Be	mg/kg	1,2	1,1	1,5
Mg	mg/kg	14000	13000	13000
Co	mg/kg	34	173	30
Ga	mg/kg	10	9,9	13
Ge	mg/kg	1,2	1,1	1,3
In	mg/kg	<3	<2	<0,8
Sb	mg/kg	82	67	47
Nb	mg/kg	13	11	12
Ta	mg/kg	2,0	1,2	1,5
W	mg/kg	15	8,3	21
Ru	mg/kg	<0,015	<0,015	<0,015
Rh	mg/kg	<0,08	<0,05	<0,05
Pd	mg/kg	<5	<5	<5
Ir	mg/kg	<0,007	<0,007	<0,007
Pt	mg/kg	<0,4	<0,2	<0,2
Ag	mg/kg	6,8	3,8	3,3
Au	mg/kg	9,1 och <0,5	<0,5	<0,5
Sc	mg/kg	5,0	4,0	5,2
Y	mg/kg	15	12	16
La	mg/kg	20	15	19
Ce	mg/kg	41	43	46
Pr	mg/kg	4,4	3,6	4,5
Nd	mg/kg	20	14	16
Sm	mg/kg	2,5	2,0	2,7
Eu	mg/kg	0,60	0,55	0,78
Gd	mg/kg	2,3	2,0	2,5
Tb	mg/kg	0,47	0,43	0,63
Dy	mg/kg	2,3	2,0	2,3
Ho	mg/kg	0,45	0,37	0,45
Er	mg/kg	1,9	2,9	1,8
Tm	mg/kg	0,25	0,17	0,24
Yb	mg/kg	1,5	1,2	1,4
Lu	mg/kg	0,25	0,20	0,25
P	(vikt-%)	0,44	0,25	0,19
Al	(vikt-%)	5,4	5,8	6,9
Cu	(vikt-%)	1,0 och 1,6	0,46 och 0,46	0,63 och 0,28
Zn	(vikt-%)	0,52	0,29	0,23

## D.6 Beräknade totala medelvärden för kritiska metaller i de svenska avfallsaskorna

Tabell 19. Beräknade medelhalter för kritiska metaller i de svenska avfallsaskorna.

Table 19. Calculated average concentrations of critical metals in residues from Swedish waste-to-energy plants.

Analyt	Enhet	Flygaska från alla anläggningar				Bottenaska från alla anläggningar			
		Medel	Median	Std	95% konf	Medel	Median	Std	95% konf
<b>Be</b>	mg/kg	0,69	0,74	0,27	0,16	1,4	1,2	0,37	0,23
<b>Mg</b>	mg/kg	14000	15000	3500	2200	13000	13000	1700	1100
<b>Sc</b>	mg/kg	3,0	3,3	1,0	0,65	4,8	4,7	0,49	0,30
<b>Co</b>	mg/kg	35	35	14	8,4	42	40	13	8,2
<b>Ga</b>	mg/kg	9,9	11	3,2	2,0	12,7	11,9	2,8	1,7
<b>Ge</b>	mg/kg	1,7	1,4	0,96	0,59	1,3	1,3	0,20	0,12
<b>Nb</b>	mg/kg	11	14	4,3	2,7	13	13	1,9	1,2
<b>Ag</b>	mg/kg	26	20	18	11	11	6,8	14	8,4
<b>Sb</b>	mg/kg	800	730	430	270	130	120	64	39
<b>La</b>	mg/kg	15	16	5,1	3,2	22	22	2,8	1,7
<b>Ce</b>	mg/kg	26	28	9,1	5,7	47	46	7,9	4,9
<b>Pr</b>	mg/kg	2,9	3,0	1,0	0,65	5,1	4,9	1,0	0,64
<b>Nd</b>	mg/kg	11	12	3,7	2,3	20	18	3,8	2,3
<b>Sm</b>	mg/kg	1,7	1,7	0,57	0,35	2,9	2,7	0,59	0,36
<b>Eu</b>	mg/kg	0,51	0,58	0,16	0,10	0,67	0,66	0,08	0,05
<b>Gd</b>	mg/kg	1,6	1,6	0,52	0,32	2,6	2,4	0,60	0,37
<b>Tb</b>	mg/kg	0,37	0,38	0,12	0,08	0,50	0,51	0,05	0,03
<b>Dy</b>	mg/kg	1,4	1,4	0,38	0,24	2,4	2,4	0,45	0,28
<b>Ho</b>	mg/kg	0,26	0,25	0,07	0,04	0,46	0,45	0,08	0,05
<b>Er</b>	mg/kg	0,86	0,81	0,28	0,18	2,1	1,9	0,45	0,28
<b>Tm</b>	mg/kg	0,12	0,12	0,04	0,02	0,20	0,20	0,03	0,02
<b>Yb</b>	mg/kg	0,78	0,75	0,25	0,16	1,36	1,34	0,22	0,13
<b>Y</b>	mg/kg	11	12	3,0	1,9	14	14	1,2	0,75
<b>Lu</b>	mg/kg	0,12	0,11	0,04	0,02	0,20	0,20	0,03	0,02
<b>Ta</b>	mg/kg	1,5	1,5	0,54	0,33	1,4	1,5	0,33	0,20
<b>W</b>	mg/kg	25	14	36	22	25	13	32	20
<b>Al</b>	vikt-%	4,1	3,8	2,4	1,5	5,6	5,7	0,38	0,23
<b>Cu</b>	vikt-%	0,22	0,15	0,15	0,09	1,1	0,74	0,84	0,52
<b>P</b>	vikt-%	0,44	0,50	0,21	0,13	0,37	0,37	0,15	0,09
<b>Zn</b>	vikt-%	1,7	1,4	1,1	0,65	0,37	0,38	0,08	0,05

## D.7 Beräknade medelvärden av kritiska metaller i flygaskor från roster- och fb-pannor

Tabell 20. Beräknade medelhalter för de kritiska metallerna i flygaskor från svenska avfallsförbränningsanläggningar.

Table 20. Calculated average concentrations of critical metals in fly ashes from Swedish waste-to-energy plants.

Analyt		Rosterpannor				Fb-pannor			
		Medel	Median	Std	95% konf	Medel	Median	Std	95% konf
<b>Be</b>	mg/kg	0,56	0,61	0,22	0,16	0,98	0,96	0,04	0,05
<b>Mg</b>	mg/kg	13000	13000	3700	2800	16000	16000	1200	1400
<b>Sc</b>	mg/kg	2,5	2,6	0,91	0,67	4,0	4,1	0,17	0,19
<b>Co</b>	mg/kg	32	29	13	9,8	43	42	11	12
<b>Ga</b>	mg/kg	8,8	9,0	3,0	2,3	13	13	1,4	1,6
<b>Ge</b>	mg/kg	2,1	1,7	0,98	0,73	0,99	0,91	0,14	0,16
<b>Nb</b>	mg/kg	10	13	4,8	3,6	14	14	0,30	0,34
<b>Ag</b>	mg/kg	21	19	6,9	5,1	40	30	26	30
<b>Sb</b>	mg/kg	1000	1000	350	260	320	330	58	66
<b>La</b>	mg/kg	12	15	4,1	3,1	20	20	1,6	1,8
<b>Ce</b>	mg/kg	22	25	7,4	5,4	36	36	2,4	2,7
<b>Pr</b>	mg/kg	2,4	2,5	0,85	0,63	4,1	4,0	0,06	0,07
<b>Nd</b>	mg/kg	9,5	10,0	3,3	2,5	15	15	0,17	0,19
<b>Sm</b>	mg/kg	1,4	1,5	0,40	0,30	2,4	2,4	0,06	0,07
<b>Eu</b>	mg/kg	0,45	0,48	0,15	0,11	0,67	0,69	0,06	0,07
<b>Gd</b>	mg/kg	1,3	1,3	0,33	0,24	2,2	2,1	0,26	0,30
<b>Tb</b>	mg/kg	0,32	0,36	0,10	0,08	0,49	0,45	0,09	0,10
<b>Dy</b>	mg/kg	1,2	1,3	0,26	0,19	1,9	1,9	0,07	0,08
<b>Ho</b>	mg/kg	0,22	0,23	0,05	0,03	0,35	0,35	0,02	0,02
<b>Er</b>	mg/kg	0,71	0,76	0,17	0,13	1,2	1,2	0,11	0,13
<b>Tm</b>	mg/kg	0,10	0,11	0,03	0,02	0,17	0,15	0,03	0,03
<b>Yb</b>	mg/kg	0,65	0,68	0,17	0,12	1,10	1,14	0,06	0,07
<b>Y</b>	mg/kg	9,7	9,2	2,6	1,9	14	13	1,4	1,6
<b>Lu</b>	mg/kg	0,10	0,09	0,03	0,02	0,16	0,15	0,02	0,03
<b>Ta</b>	mg/kg	1,3	1,3	0,38	0,28	2,1	1,8	0,50	0,56
<b>W</b>	mg/kg	29	13	42	31	17	16	3,6	4,1
<b>P</b>	vikt-%	0,42	0,51	0,18	0,13	0,50	0,49	0,27	0,30
<b>Al</b>	vikt-%	2,7	3,2	1,2	0,86	7,4	7,4	0,81	0,92
<b>Cu</b>	vikt-%	0,13	0,12	0,04	0,03	0,44	0,46	0,03	0,04
<b>Zn</b>	vikt-%	2,1	1,8	1,02	0,76	0,74	0,80	0,17	0,19

## D.8 Beräknade medelvärden av kritiska metaller i bottenaskor från roster- och fb-pannor

Tabell 21. Beräknade medelhalter av kritiska metaller i bottenaska från svenska avfallsförbränningsanläggningar.

Table 21. Calculated average concentrations of critical metals in bottom ash from Swedish waste-to-energy plants.

		Rosterpannor				Fb-pannor			
		Medel	Median	Std	95% konf	Medel	Median	Std	95% konf
<b>Be</b>	mg/kg	1,2	1,2	0,09	0,07	1,9	1,8	0,17	0,19
<b>Mg</b>	mg/kg	14000	14000	750	560	10000	10000	210	230
<b>Sc</b>	mg/kg	4,49	4,38	0,27	0,20	5,39	5,55	0,25	0,29
<b>Co</b>	mg/kg	45	40	11	8,5	34	26	14	15
<b>Ga</b>	mg/kg	12	10	2,9	2,2	14	13	2,1	2,4
<b>Ge</b>	mg/kg	1,2	1,3	0,14	0,10	1,5	1,5	0,09	0,11
<b>Nb</b>	mg/kg	13	13	1,5	1,1	10	11	0,79	0,90
<b>Ag</b>	mg/kg	7,5	6,3	3,5	2,6	20	7,2	22	25
<b>Sb</b>	mg/kg	99	90	37	28	210	180	41	47
<b>La</b>	mg/kg	21	21	2,3	1,7	25	25	0,69	0,78
<b>Ce</b>	mg/kg	43	42	4,9	3,6	57	55	3,8	4,3
<b>Pr</b>	mg/kg	4,8	4,7	1,1	0,78	5,9	6,0	0,19	0,21
<b>Nd</b>	mg/kg	18	18	3,5	2,6	23	24	2,0	2,3
<b>Sm</b>	mg/kg	2,5	2,5	0,37	0,27	3,6	3,6	0,18	0,21
<b>Eu</b>	mg/kg	0,65	0,65	0,08	0,06	0,70	0,67	0,08	0,09
<b>Gd</b>	mg/kg	2,4	2,2	0,64	0,47	2,9	2,8	0,37	0,42
<b>Tb</b>	mg/kg	0,51	0,52	0,06	0,04	0,48	0,51	0,04	0,05
<b>Dy</b>	mg/kg	2,3	2,1	0,49	0,36	2,6	2,6	0,25	0,28
<b>Ho</b>	mg/kg	0,44	0,42	0,09	0,06	0,52	0,51	0,03	0,04
<b>Er</b>	mg/kg	1,9	1,9	0,30	0,22	2,7	2,8	0,12	0,13
<b>Tm</b>	mg/kg	0,19	0,19	0,02	0,02	0,22	0,21	0,02	0,03
<b>Yb</b>	mg/kg	1,3	1,3	0,14	0,10	1,6	1,6	0,18	0,21
<b>Y</b>	mg/kg	13	13	1,0	0,75	15	15	0,58	0,65
<b>Lu</b>	mg/kg	0,18	0,19	0,03	0,02	0,23	0,23	0,03	0,03
<b>Ta</b>	mg/kg	1,4	1,3	0,35	0,26	1,5	1,6	0,27	0,31
<b>W</b>	mg/kg	28	15	37	27	19	11	12	14
<b>P</b>	vikt-%	0,44	0,41	0,10	0,07	0,19	0,18	0,10	0,12
<b>Al</b>	vikt-%	5,7	5,7	0,22	0,16	5,3	5,5	0,45	0,51
<b>Cu</b>	vikt-%	1,3	0,92	0,89	0,66	0,51	0,44	0,11	0,13
<b>Zn</b>	vikt-%	0,41	0,40	0,03	0,03	0,26	0,28	0,04	0,04

## E Referenser som använts i bilaga A-C.

- [1] EPOW, "Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England", E.A. European Pathway to Zero Waste, Reading, 2011.
- [2] Environmental Chemistry, <http://environmentalchemistry.com/>, [tillgänglig: 2013-11-01].
- [3] European Commission, "Critical raw materials for the EU; Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials", E. Commission, Brussels, 2010.
- [4] British Geological Survey, "European Mineral Statistics 2006-10", 366, B.G. Survey, Keyworth, Nottingham, 2012.
- [5] U. S. Geological Survey, "Mineral commodity summaries 2013", 198, U.S.G. Survey, 2013.
- [6] U. S. Geological Survey, "Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States", <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/>, [tillgänglig: 2013-02-19].
- [7] Sternbeck, J., A. Palm, and K. Lennart, "Antimon i Sverige - Användning spridning och miljöpåverkan", IVL rapport B1473, I.S.M. AB, Stockholm, 2002.
- [8] Emsley, J., "Nature's building blocks: an A-Z guide to the elements". Oxford University Press. pp. 268–270, ISBN 978-0-19-960563-7, 2011.
- [9] Nationalencyklopedin: NE- Nationalencyklopedin AB. 2013.
- [10] Kungliga vetenskapsakademien, "Sveriges landskapsgrundämnen", <http://www.landskapsgrundamnen.se/sid1.htm>, [tillgänglig: 2013-02-25].
- [11] Sveriges Geologiska Undersökningar, "Mineralmarknaden, Tema: Platinametallerna", 2001:2, S.G. Undersökning, 2001.
- [12] Hans Wedepohl, K., "The composition of the continental crust". Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(7): p. 1217-1232, 1995.
- [13] Butler, J., "Platinum 2012 Interim Review", <http://www.platinum.matthey.com/publications/pgm-market-reviews>, [tillgänglig: 2013-02-25].
- [14] Lide, D.R., ed. CRC "Handbook of Chemistry and Physics". ed. B. Raton CRC Press, 2004.
- [15] Deschamps, Y. "Scandium", [www.mineralinfo.com](http://www.mineralinfo.com), 2008.
- [16] Kristiansen, R., "Scandium - mineraler i Norge", in Stein, p. 14-23, 2003.
- [17] mmta - Minor metals trade association, <http://www.mmta.co.uk/metals/>, [tillgänglig: 2013-10-10].
- [18] Patniak, P., "Handbook of Inorganic Chemical Compounds" McGraw-Hill. ISBN 0-07-049439-8, 2003.
- [19] Gschneidner, K.A., and Eyring, L., "Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths", North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1978.
- [20] New Scientist, p. 40, June 2011.
- [21] Bradsher, K., "In China, Illegal Rare Earth Mines Face Crackdown". The New York Times, December , 2010.
- [22] Walker, Perrin and Tarn, William H., "CRC Handbook of Metal Etchants". CRC Press, pp. 1241–. ISBN 978-1-4398-2253-1, 2010.

- [23] U.S. Geological survey, “Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States”, Data series 140, 2013
- [24] Boliden, [www.boliden.se](http://www.boliden.se), [tillgänglig: 2013-10-17].
- [25] Metalprices, <http://www.metalprices.com/>, [tillgänglig: 2013-10-22].
- [26] Chemicool, [www.chemicool.com](http://www.chemicool.com), [tillgänglig: 2013-10-22].
- [27] Mineralprices, [www.mineralprices.com](http://www.mineralprices.com), [tillgänglig: 2013-10-22].



**WASTE REFINERY**

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut  
Box 857, 501 15 Borås  
[wasterefinery@sp.se](mailto:wasterefinery@sp.se)  
[www.wasterefinery.se](http://www.wasterefinery.se)