

Innovationskritiska metaller och mineral – en forskningsöversikt

ISSN 1653-0942
ISBN 978-91-7915-049-5
Riksdagstryckeriet, Stockholm 2022

Förord

Metaller och mineral används överallt i ett modernt samhälle. De finns i allt från fordon till teknik för energiomvandling, byggnader och sjukvård samt matproduktion och tillverkningsindustri. Den tekniska utvecklingen under senare år har inneburit ett ökat behov av metaller och mineral som är avgörande för att moderna energi-, miljö- och teknikinnovationer ska fungera – s.k. innovationskritiska metaller och mineral. Behovet har dessutom förstärkts av den pågående gröna omställningen av samhället och bedöms av bl.a. EU-kommissionen även öka kraftigt framöver. Samtidigt finns det utmaningar att i samband med gruvdrift tillgodose konkurrerande intressen, bl.a. när det gäller olika hållbarhetsaspekter. Det kan även konstateras att utvinningen av innovationskritiska metaller och mineral är koncentrerad till endast ett fåtal länder utanför EU där Kina i dagsläget dominerar stort.

Näringsutskottets grupp för uppföljning och utvärdering beslutade i maj 2021, på mandat av utskottet, att göra en forskningsöversikt som kan ge en bild av kunskapsläget när det gäller Sveriges tillgång till innovationskritiska metaller och mineral från brytning, sekundäravfall och återvinning. Av särskilt intresse var forskningsrön som rör styrmedel och teknik för åtkomst av innovationskritiska metaller och mineral via återvinning. Kartläggningen har huvudsakligen genomförts genom att ett antal forskare har fått i uppdrag att sammanställa viktigare slutsatser från forskning och utveckling vid universitet, högskolor, forskningsinstitut och industri. Uppdragen omfattar hela värdekedjan från prospektering till återvinning av innovationskritiska metaller och mineral med fokus på utveckling och framtida lösningar.

Mot bakgrund av ett ökat behov av innovationskritiska metaller och mineral samt det rådande säkerhetspolitiska läget i omvärlden vill gruppen framhålla vikten av att kunskapsläget när det gäller Sveriges tillgång blir belyst. Gruppen kan samtidigt konstatera att det behövs mer forskning och utveckling på området. Förhoppningsvis kan denna forskningsöversikt utgöra en del av det underlag som riksdagens partier behöver för att forma sin politik på området framöver.

Sammanställningen av forskarnas skriftliga underlag har gjorts av Riksdagsförvaltningens utvärderings- och forskningssekretariat i samråd med näringsutskottets kansli.

Näringsutskottets grupp för uppföljning och utvärdering överlämnar härmed sin rapport med forskningsöversikten till utskottet.

Stockholm i april 2022

Ann-Charlotte Hammar Johnsson (M)

Mathias Tegnér (S)

Eric Palmqvist (SD)

Helena Lindahl (C)

Birger Lahti (V)

Camilla Brodin (KD)

Arman Teimouri (L)

Amanda Palmstierna (MP)

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning.....	6
1 Inledning.....	10
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte och metod.....	10
1.3 Disposition	11
2 Innovationskritiska metaller och mineral.....	12
2.1 Definition	12
2.2 Lagstiftning och politiska målsättningar	13
2.3 Användning och behov av innovationskritiska metaller och mineral.....	16
2.4 Förekomst av innovationskritiska metaller och mineral.....	19
2.5 Återvinning av innovationskritiska metaller.....	22
2.6 Globala värdekedjor koncentrerade till ett fåtal länder.....	25
3 Kunskapsläget i Sverige om innovationskritiska metaller och mineral.....	27
3.1 SGU tillhandahåller geologisk information.....	27
3.2 Forskning om innovationskritiska metaller och mineral.....	28
3.3 Behovet av mer grundläggande forskning är stort.....	31
3.4 Tillgång till och potential för ett urval metaller och mineral.....	32
3.4.1 Kobolt	33
3.4.2 Litium.....	34
3.4.3 Sällsynta jordartsmetaller.....	36
3.4.4 Vanadin.....	38
3.4.5 Grafit.....	38
3.4.6 Indium.....	39
3.4.7 Nickel.....	40
3.4.8 Germanium och gallium.....	40
3.4.9 Molybden	41
3.4.10 Slutsatser om uppskattad potential	41
4 Styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller och mineral.....	43
4.1 Återvinningsprocessen komplex.....	44
4.2 Problem med lönsamheten i återvinningen.....	45
4.3 Teknologiska restriktioner.....	45
4.4 Institutionella barriärer	46
4.5 Framgångsfaktorer för styrmedel	47
Källförteckning.....	52

Bilagor

Kartläggning över forskning om innovationskritiska metaller och mineral.....	54
FoU om återvinning av innovationskritiska metaller och mineral.....	94
Barriärer och styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller: lärdomar från forskningslitteraturen	118

Sammanfattning

Uppdraget

Näringsutskottets grupp för uppföljning och utvärdering beslutade i maj 2021, på mandat av utskottet, att ta fram ett underlag som kan ge en bild över kunskapsläget kring Sveriges tillgång till innovationskritiska metaller och mineral från brytning, sekundäravfall och återvinning. Av särskilt intresse är forskningsrön som rör styrmedel och teknik för åtkomst av innovationskritiska metaller och mineral via återvinning. Kartläggningen har huvudsakligen genomförts genom att ett antal forskare har fått i uppdrag att lämna in skriftliga underlag med en aktuell bild av kunskapsläget.

Definition av innovationskritiska metaller och mineral

Begreppet innovationskritiska metaller och mineral refererar till metaller och mineral som är av hög ekonomisk betydelse för en viss bransch eller industri-sektor eller ett geografiskt område och som det av olika orsaker riskerar att bli försörjningsbrist på. Hur kritiskt ett visst råmaterial är för produktionen av en viss vara kan förändras över tid och reflekterar bl.a. nuvarande och förväntad framtida efterfrågan, globala politiska förhållanden och teknisk utveckling. EU-kommissionen har listat råvaror som bedöms som kritiska för samhället och för välfärden. Den senaste listan kom 2020 och innehåller 30 innovationskritiska metaller och mineral.

Stort och ökande behov av metaller och mineral

Det finns en stor och ökande efterfrågan på samtliga metaller, och störst tillväxt i efterfrågan bedöms finnas för ett antal innovationskritiska metaller och mineral, nämligen; litium, sällsynta jordartsmetaller, grafit, indium och kobolt. Den enskilt viktigaste faktorn framöver för det ökande behovet av metaller är klimatomställningen. Nya teknologier kräver ofta mer metall än tidigare fossilbaserade teknologier för att producera samma slutresultat. Ambitionsnivån i klimatomställningen kommer att påverka efterfrågan av innovationskritiska metaller. EU har, jämfört med andra delar av världen, satt ambitiösa mål för klimatomställningen.

Utvinnningen globalt av innovationskritiska metaller och mineral är begränsad till ett fåtal länder. Bland dem har Kina en dominerande ställning i samtliga led av värdekedjan.

Sverige har geologisk potential för ett flertal innovationskritiska metaller och mineral

Sveriges geologiska undersökning (SGU) har bedömt att Sverige har geologisk potential för ett flertal innovationskritiska råmaterial och har visat flera malmberäknade fyndigheter där dessa råmaterial ingår, t.ex. sällsynta jordartsmetaller, grafit, kobolt, litium, nickel, platinagruppens metaller, titan och vanadin. Tillväxtanalys har analyserat hela värdekedjan från utvinning av primära råmaterial till nya miljö- och teknikinnovationer och funnit att det för litium, sällsynta jordartsmetaller, grafit, volfram och kobolt har förutsättningar för framtida hela produktionskedjor i Sverige. I det urval av metaller och mineral som kartlagts i denna studie bedöms den uppskattade potentialen i Sverige vara störst för grafit, vanadin och sällsynta jordartsmetaller.

Återvinningen av innovationskritiska metaller är begränsad

Metaller har goda förutsättningar för ett kretslopp eftersom de till skillnad från många andra material inte tappar i kvalitet när de används, mals ned, smälts eller löses upp. Trots förutsättningar att återvinna metaller oändligt många gånger är omfattningen på återvinningen begränsad. Andelen innovationskritiska metaller och mineral som återvinns från konsumentprodukter är generellt mycket låg, ofta bara några procent. Bristande lönsamhet är det främsta skälet. Innovationskritiska metaller och mineral finns ofta i låga koncentrationer i komplexa produkter, och återvinningstekniken är inte fullt färdigutvecklad. Trenden i produktutvecklingen går dessutom mot att det finns mindre och mindre av de dyrbara metallerna i varje produkt. Detta innebär att återvinningen blir än mer komplicerad och ökar på sikt risken för att mindre av metallerna återvinns totalt sett och mer hamnar i diverse avfallsströmmar som saknar metallåtervinning som en del i processen.

Gruvavfall har potential för utvinning av sällsynta jordartsmetaller

Med moderna metoder kan det vara möjligt att ur gruvavfall utvinna mineral och metaller som inte var möjliga att utvinna med äldre teknik. Återvinning ur gruvavfall kan dessutom ge en miljövinst genom att man återanvänder och bortskaffar potentiellt miljöfarligt avfall. SGU har gjort och gör analyser av gruvavfall samt vilka metaller som kan utvinnas ur det. SGU har funnit att det finns en hel del metallinnehåll i gruvavfall, men osäkerheten är stor om vilka mängder som finns totalt och om utvinning är ekonomiskt lönsamt. Det pågår projekt för utvinning ur gruvavfall med potential för sällsynta jordartsmetaller och fosfor.

Industri och forskning samverkar väl – forskningen inom området är begränsad

Enligt en av forskarrapporterna är den samlade omfattningen av forskning vid svenska universitet och högskolor inom området innovationskritiska metaller och mineral, i en värdekedja som innefattar prospektering och utvinning av jungfruligt material, utvinning ur gruvornas restprodukter, samt miljöaspekter av detta, relativt begränsad. Flera lärosäten i Sverige bedriver forskning på innovationskritiska metaller och mineral, men denna rör bara ett fåtal forskare inom avgränsade områden. Ett undantag är Luleå tekniska universitet (LTU) som är den resursstarkaste forskningsmiljön i Sverige med ca 25 forskare som bedriver forskning relaterad till innovationskritiska metaller och mineral längs hela värdekedjan.

Det finns en väl fungerande samverkan mellan universitet och högskolor samt gruvbolag och teknikleverantörer. Samverkan bidrar till att forskningen inom området har industriell relevans och skapar förutsättningar för nyttiggörande. Den forskning som industrin prioriterar och bedriver i samverkan med akademien bedöms vara i världsklass. Ett problem är att den forskning som industrin inte prioriterar i dagsläget är svår att få finansiering för och utförs därför i stort sett inte. Forskningen om metaller och mineral som inte ingår i de större företagens rådande strategier, vilket gäller de flesta innovationskritiska metaller och mineral, är därför begränsad i Sverige.

Antalet forskningsmiljöer i Sverige som fokuserar på utveckling av effektiva återvinningsprocesser för innovationskritiska metaller och mineral är mycket litet.

Forskningen på EU-nivå utgörs till stor del av sammanställningar och kartläggningar över redan kända mineraliseringar med historiska data. Ett exempel på sådan samverkan är Frameprojektet (Forecasting and Assessing Europe's Strategic Raw Materials Needs) som avslutades i oktober 2021 och som gett ökad kunskap om den geologiska potentialen av utvalda kritiska metaller och mineral inom EU.

Enligt en av forskarrapporterna finns en otillräcklig berggrundsgeologisk och malmgenetisk forskningsuppbyggnad i Sverige vad gäller innovationskritiska metaller och mineral, samt kunskapsluckor längs hela värdekedjan. Den svenska berggrunden är i dagsläget dessutom inte prospekterad i en sådan utsträckning att det finns en heltäckande bild av berggrundens sammansättning och det finns stora områden där sådan kunskap saknas. För säkrare slutsatser om potential till en inhemsk produktion av nya metaller krävs, enligt forskarrapporten, kunskapsuppbyggnad mer i detalj kring kända fyndigheter och berggrund.

Styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller och mineral

Av en av forskarrapporterna framgår det att forskningen om styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller och mineral är begränsad. Det finns få empiriska erfarenheter av styrmedel som är utformade för att främja återvinningen av specifikt innovationskritiska metaller. I forskarrapporten har man identifierat några generella barriärer för ett fungerande återvinningssystem vilka hänförs till frågor om bristande lönsamhet, teknologiska restriktioner och institutionella barriärer. Några av de framgångsfaktorer som framkommit i forskarrapporten som kan beaktas vid utformning av styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller och mineral är i korthet följande:

- Produktperspektiv i utformningen av styrmedel
- Produktpass – ökad information om innehåll
- Kombinera styrmedel
- Skapa förutsättningar för cirkulära affärsmodeller
- Väl definierade äganderätter
- Pilot- och demonstrationsanläggningar
- Systemövergripande styrmedel.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Behovet av metaller och mineral ökar i takt med en ökad ekonomisk tillväxt såväl i Sverige som globalt. Den tekniska utvecklingen under senare år har särskilt lyft behovet av s.k. innovationskritiska metaller och mineral. Den utvecklingen har förstärkts under den pågående gröna omställningen och bedöms öka kraftigt framöver. Tillgången till dessa metaller och mineral via gruvbrytning är koncentrerad till ett fåtal länder. EU och enskilda länder i Europa har upprättat listor på innovationskritiska metaller och mineral och utformat policyprogram för att säkra tillgången.

1.2 Syfte och metod

Syftet med denna rapport är att ge en bild av kunskapsläget utifrån forskningsrön om Sveriges tillgång till innovationskritiska metaller och mineral från brytning, sekundäravfall och återvinning. Av särskilt intresse är forskningsrön som rör styrmedel och teknik för åtkomst av innovationskritiska metaller och mineral via återvinning.

Kartläggningen har huvudsakligen genomförts genom att ett antal forskare fått ett uppdrag att lämna in skriftliga underlag som ger en aktuell bild av kunskapsläget. Uppdragen har varit att sammanställa viktigare slutsatser från forskning och utveckling vid universitet, högskolor, forskningsinstitut och industri inom hela värdekedjan från prospektering till återvinning av innovationskritiska metaller och mineral med fokus på utveckling och framtida lösningar. Sammanlagt fem forskare har bidragit med tre kartläggningar enligt ovan där den första avsåg prospektering och utvinning från malm och gruvavfall (professor Christina Wanhainen och lektor Olof Martinsson), den andra avsåg återvinning av innovationskritiska metaller och mineral (bitr. professor Teodora Retegan Vollmer och professor Christian Ekberg) och den tredje en kartläggning av och diskussion om barriärer för att öka återvinningen samt vilka effekter olika styrmedel har haft (professor Patrik Söderholm). Närmare presentationer av forskarna finns i bilagorna.

Det har inte varit genomförbart att kartlägga kunskapsläget för samtliga innovationskritiska metaller och mineral och därför har ett urval gjorts i samråd med de medverkande forskarna. I forskarrapporten som avser prospektering och utvinning (bil. 1) har urvalet gjorts på mineraler som har en geologisk potential i Sveriges berggrund. I forskarrapporten om återvinning (bil. 2) har urvalet gjorts på metaller som är relevanta för s.k. klimatteknologier. Forskarrapporten om styrmedel för återvinning (bil. 3) avser mer generellt innovationskritiska metaller och mineral. Forskarnas slutrapporter finns som bilagor till denna rapport.

Därutöver har underlag hämtats in om kunskapsläget från en rad rapporter framtagna av myndigheter och organisationer inom ämnesområdet, bl.a. från Sveriges geologiska undersökning (SGU), Tillväxtanalys, Research Institute of Sweden (RISE), Svemin, Internationella energiorganet (IEA) och Europeiska kommissionen (i det följande kommissionen). Olika exempel på utvecklingsprojekt har hämtats från webbsidor samt dags- och fackpress. Översikten är huvudsakligen dokumentbaserad. Ett fåtal intervjuer genomfördes initialt med sakkunniga inom området.

1.3 Disposition

I kapitel 2 redovisas innovationskritiska metaller och mineral utifrån definitioner, lagar och politiska målsättningar, användningsområden, förekomst och behov samt en översiktlig redovisning av forskning och utveckling (FoU) inom området. I kapitel 3 ges en mer detaljerad redovisning av kunskapsläget kring det urval av metaller och mineral som studerats i de olika uppdragen. I kapitel 4 redovisas huvudsakliga iakttagelser av vad forskningen säger om effekter av styrmedel inom området återvinning av metaller.

2 Innovationskritiska metaller och mineral

Sammanfattning: EU-kommissionen har listat s.k. innovationskritiska metaller och mineral. Det är metaller och mineral som är av stor ekonomisk betydelse för en viss bransch eller industrisektor eller ett geografiskt område och som det av olika orsaker riskerar att bli försörjningsbrist på. Behoven av metaller och mineral ökar i samhället, särskilt av innovationskritiska metaller och mineral på grund av klimatomställningens nya teknologier (t.ex. elektriska motorer, batterier samt sol- och vindkraft). Den globala utvinningen av innovationskritiska metaller och mineral är begränsad till få länder. Bland dessa har Kina en dominerande ställning i hela värdekedjan. Utvinning sker även i större mängder i bl.a. Brasilien, Ryssland, Sydafrika, och USA. Återvinningen av metall har goda förutsättningar, men återvinningen av innovationskritiska metaller är mycket begränsad och täcker inte produktionsbehoven. Utvinningen av gruvavfall har större potential, särskilt när det gäller sällsynta jordartsmetaller.

2.1 Definition

Begreppet innovationskritiska metaller och mineral refererar till metaller och mineral som är av stor ekonomisk betydelse för en viss bransch eller industrisektor eller ett geografiskt område och som det av olika orsaker riskerar att bli försörjningsbrist på. Hur kritiskt ett visst råmaterial är för produktionen av en viss vara kan förändras över tid och reflekterar bl.a. nuvarande och förväntad framtida efterfrågan, globala politiska förhållanden och teknisk utveckling. Karaktäristiskt för många innovationskritiska metaller och mineral är att de sällan utgör stora volymer eller ingår i större mängd i produkter, i jämförelse med basmetaller (koppar, zink, bly, aluminium) och järn, men att de är viktiga beståndsdelar.

Kommissionen har listat metaller och mineral som bedöms som kritiska för vårt samhälle och för välfärden. År 2011 presenterades den första kritiska listan och innehöll då 14 metaller och mineral. Listan reviderades 2014 och 2017 och antalet ämnen har ökat. Vid den senaste revideringen 2020 innehöll listan följande 30 ämnen: antimon, baryt, bauxit, beryllium, borater, flusspat, fosfat-mineral, fosfor, gallium, germanium, grafit, hafnium, indium, lätta sällsynta jordartsmetaller (LREE), tunga sällsynta jordartsmetaller (HREE), kisel, kobolt, koks, litium, magnesium, naturgummi, niob, platinagruppens metaller (PGE), skandium, strontium, tantal, titan, vanadin, vismut och volfram.¹

¹ Resiliens för råvaror av avgörande betydelse, EU-kommissionen, 3.9.2020 (COM(2020) 474).

2.2 Lagstiftning och politiska målsättningar

Målsättningar, ramverk och regelverk som påverkar utvinningen av innovationskritiska metaller och mineral återfinns i bl.a. minerallagen (1991:45), miljöbalken, internationella överenskommelser, olika strategier från regeringen och det klimatpolitiska ramverket (prop. 2016/17:146). 2020 års alunskifferutredning gjorde en utförlig genomgång av lagstiftning och olika målsättningar vilket tjänat som underlag för redovisningen nedan.²

Minerallagen och miljöbalken

Miljöbalken syftar till att främja en hållbar utveckling som innebär att nuvarande och kommande generationer tillförsäkras en hälsosam och god miljö. Syftet med minerallagen är att möjliggöra samhällets försörjning av nödvändiga metaller och mineral genom särskilt utpekade naturresurser, definierade som koncessionsmineral. Koncessionsmineral är mineral som anses särskilt nödvändiga för samhället och för dessa gäller minerallagens bestämmelser. De flesta metaller hör till denna kategori. För övriga mineral (s.k. jordägarmineral eller markägarmineral) utom energitorv gäller miljöbalkens bestämmelser. Kartläggningen av metall- och mineralförekomster i Sverige sker i huvudsak genom undersökningar som görs av prospektörer. Eftersom undersökningsarbete kräver stora investeringar och det ekonomiska utfallet är osäkert, anses det viktigt att en prospektör får så säkra garantier som möjligt att få bearbeta de fyndigheter som påträffas. Miljölagstiftningen reglerar sedan prövningen av de miljöfrågor som är hänförliga till gruvverksamheten. Miljöfrågorna prövas i ett sammanhang i den obligatoriska miljöprövning som görs enligt miljöbalken. Prövningen initieras genom verksamhetsutövarens tillståndsansökan.

Miljöbalken och minerallagen gäller parallellt. Vanligen söks först bearbetningskoncession enligt minerallagen och därefter tillstånd enligt miljöbalken. Det finns dock inte något hinder mot att först ansöka om miljötillstånd, och det har också gjorts i vissa fall. Minst följande prövningar krävs:

- undersökningstillstånd och arbetsplan enligt minerallagen – prövas av bergmästaren
- bearbetningskoncession enligt minerallagen – prövas av bergmästaren
- tillstånd enligt miljöbalken – prövas av länsstyrelsens miljöprövningsdelegation eller mark- och miljödomstolen
- markanvisning enligt minerallagen – beslutas vid en särskild förrättning som hålls av bergmästaren
- bygg- och marklov enligt plan- och bygglagen – prövas av kommunens byggnadsnämnd.

Tillstånd och dispenser kan också krävas t.ex. om ett Natura 2000-område skulle påverkas eller om verksamheten skulle innebära påverkan på kulturminnesskydd,

² SOU 2020:71 s. 74 f.

strandskydd, artskydd eller biotopskydd. Dessa prövas i huvudsak inom ramen för miljöbalksprövningen. En översikt av processen ges i figur 1.

I sammanhanget kan noteras att regeringen har tillsatt Miljöprövningsutredningen (M 2020:06) med uppdrag att lämna förslag på åtgärder för att uppnå en mer modern och effektiv prövning enligt miljöbalken. Utredningen ska lämna sitt betänkande senast den 31 maj 2022.

Vidare har regeringen tillsatt en utredning om prövningsprocesser och regelverk för en hållbar försörjning av innovationskritiska metaller och mineral (N2021:01). Utredningen ska analysera och föreslå förändringar av prövningsprocesser och regelverk så att bättre hänsyn kan tas till både ett projekts lokala miljöpåverkan och dess samhällsnytta. Utredningen ska lämna sitt betänkande i slutet av oktober 2022.

Figur 1 Prövning av gruvverksamhet – processen från undersökningstillstånd till bygg- och marklov



Olika strategier från regeringen

Regeringen beslutade 2013 om en mineralstrategi³. Målet med strategin var att öka konkurrenskraften i svensk gruv- och mineralnäring, så att Sverige skulle behålla och förstärka sin position som EUs ledande gruvland. Vidare var målet att Sveriges mineraltillgångar skulle nyttjas på ett långsiktigt hållbart sätt, med beaktande av ekologiska, sociala och kulturella dimensioner så att natur- och kulturmiljöer bevaras och utvecklas. I mineralstrategin identifierades fem strategiska områden som bedömdes vara av särskild vikt för att nå strategins vision. Inom de fem strategiska områdena beskrevs sammanlagt elva åtgärdsområden till vilka 19 åtgärder var kopplade. Av större relevans för innovationskritiska metaller och mineral var åtgärdsområde Ökad resurseffektivitet. Där framgår att utvinning och bearbetning av malm och mineral från den svenska berggrunden ska ske med ökad resurseffektivitet. Återvinningsgraden av uttjänta metalliska och mineraliska produkter och av processavfall skulle öka och avfallsmängder skulle minska. Mot denna bakgrund har flera regeringsuppdrag getts till berörda myndigheter (SGU, Tillväxtanalys, Energimyndigheten och Naturvårdsverket) vilka finns som referenser i olika avsnitt i denna sammanställning. De åtgärder som formulerades inom ramen för mineralstrategin har till stora delar genomförts och det fortsatta arbetet har sedan 2015 bedrivits inom ramen för regeringens nyindustrialiseringsstrategi⁴, där gruv- och mineralnäringen har inkluderats.

Regeringen redovisade 2020 en strategi för cirkulär ekonomi⁵. Genom strategin och det fortsatta arbetet vill regeringen undanröja hinder, stärka konkurrenskraften, öka incitamenten och bidra till långsiktiga förutsättningar för den cirkulära samhällsomställningen. I strategin lyfts innovationskritiska metaller och mineral som ett område som ska prioriteras (bl.a. återvinning av batterier, elektriska produkter och gruvavfall).

Regeringen beslutade 2022 om en ny industristrategi⁶ som konstaterar att svensk industri har goda förutsättningar att fortsätta vara drivande i klimatomställningen och omställningen till en cirkulär ekonomi. Regeringen menar att forskning och innovation är avgörande för att skapa nya lösningar och att klara omställningen. Av strategin framgår att en hållbar försörjning av kritiska metaller och mineral är centralt för omställningen, inte minst för förnybara energilösningar, och kommer först i många värdekedjor. Det finns, enligt strategin, potential att öka återvinningen av kritiska metaller och mineral från sekundära källor.

³ Sveriges mineralstrategi – För ett hållbart nyttjande av Sveriges mineraltillgångar som skapar tillväxt i hela landet. N2013.02, Regeringskansliet.

⁴ Smart industri – en nyindustrialiseringsstrategi för Sverige. N2015.38, Regeringskansliet.

⁵ Cirkulär ekonomi – strategi för omställningen i Sverige. Miljödepartementet, 2020.

⁶ Framtidens industri. En strategi om grön och digital omställning. Näringsdepartementet, 2022.

Den gröna omställningen

De övergripande målsättningarna för den gröna omställningen, dvs att omvandla samhället till ett klimatneutralt samhälle med nettonollutsläpp, anges i internationella överenskommelser (t.ex. Parisavtalet 2015 och EUs gröna giv), de nationella miljökvalitetsmålen samt i det klimatpolitiska ramverket. Det klimatpolitiska ramverket (prop. 2016/17:146) som trädde ikraft 2018 består av klimatmålen, klimatlagen (2017:720) och Klimatpolitiska rådet. Klimatmålen innebär att Sverige senast 2045 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären. Regeringen överlämnade i december 2019 en klimathandlingsplan till riksdagen (prop. 2019/20:65) av vilken det framgår att EU i mycket hög grad är importberoende i försörjningen av kritiska metaller som behövs för bl.a. elektrifieringen och fossilfri energiförsörjning. Vidare anges i propositionen att Sverige är en viktig aktör för att säkra tillgången till hållbart producerade råvaror till EUs industrier. I klimathandlingsplanen redovisas att SGU haft regeringens uppdrag att kartlägga förekomsten av innovationskritiska metaller från såväl berggrund som gruvavfall och om det finns en potential att utvinna dessa metaller i Sverige. Enligt klimathandlingsplanen kommer målsättningen om nettonollutsläpp att kräva betydande tekniksiften, t.ex. elektrifiering av transportsystemet. Klimatpolitiska rådet, som har uppdraget att utvärdera regeringens politik utifrån målsättningarna, finner att utsläppsminskningarna har bromsat in och att det krävs mer för att målen ska nås.⁷

2.3 Användning och behov av innovationskritiska metaller och mineral

Stort och ökande behov av metaller och mineral

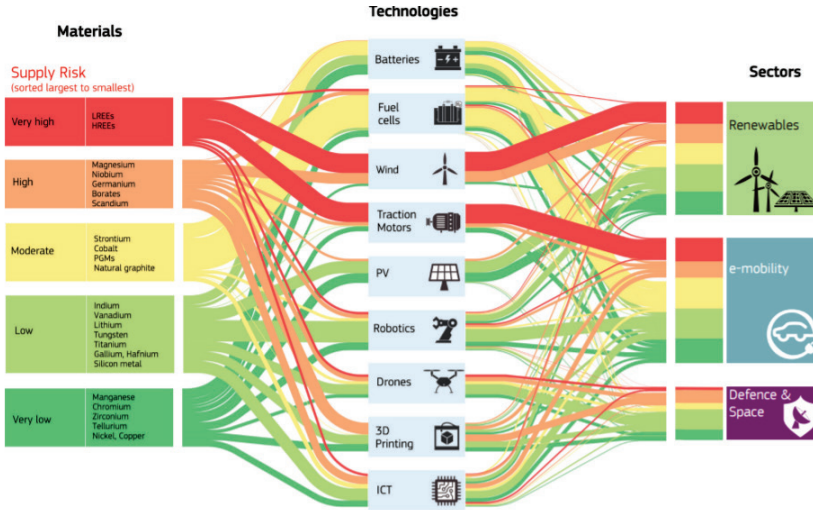
Användningen av metaller och mineral hänger nära samman med den ekonomiska utvecklingen. När länder utvecklas går de ofta igenom en fas av kraftigt ökat metallbehov för byggnader, infrastruktur, elektrisk utrustning, transporter m.m. Efter hand som utvecklingen går vidare mattas ökningstakten av. Många delar av världen har gått igenom denna utvecklingsfas (bl.a. länderna i Organisationen för ekonomiskt samarbete och utveckling, OECD), samtidigt som det finns ett uppdämt behov i andra delar av världen, t.ex. i olika utvecklingsländer. Den enskilt viktigaste faktorn framöver för det stora och ökande behovet av metaller är klimatomställningen.⁸ Den innebär ett ökat metallbehov då de nya teknologierna ofta kräver delvis andra metaller än de gamla fossila teknologierna för att producera samma slutresultat. Det handlar bl.a. om skiftet till elfordon med batterier, utbyggnaden av förnybar el (solceller och vindkraft) samt elnätutbyggnaden som behövs för att elektrifiera samhället och fasa ut fossila bränslen.

⁷ SOU 2020:71 s. 47 f.

⁸ Se bl.a. IEA (2021) The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.

I figur 2 visas en rad betydelsefulla teknologier för den gröna omställningen och vilka metaller och mineral som är väsentliga för den. Det framgår bl.a. att sällsynta jordartsmetaller (REE) är synnerligen viktiga för bl.a. vindkraft och elektriska motorer.

Figur 2 Flöden av innovationskritiska metaller och mineral och olika användningsområden⁹



Stor och ökande efterfrågan på innovationskritiska metaller

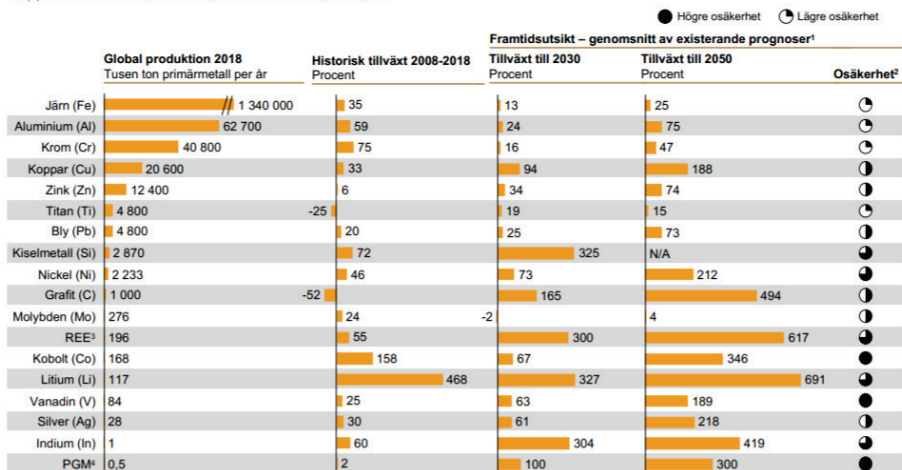
Det har tagits fram flera prognoser internationellt som visar på ett ökat behov av innovationskritiska metaller och mineral. En sammanställning av prognoser och rapporter publicerades hösten 2021 vilken gav en samlad bild över behov av metaller och mineral fram till 2030 respektive 2050.¹⁰ Underlaget är hämtat bl.a. från de senaste rapporterna från IEA, kommissionen, OECD, Världsbanken, Tillväxtanalys och SGU. Det finns flera osäkerhetsfaktorer t.ex. olika scenarier för teknisk och ekonomisk utveckling och återvinningens betydelse. I figur 3 finns en redovisning kring historisk tillväxt och framtidsutsikter utifrån genomsnitt av existerande prognoser fram till 2030 respektive 2050. Överlag finns det en ökad efterfrågan på samtliga metaller fram till 2050, och störst tillväxt i efterfrågan bedöms finnas för ett antal innovationskritiska metaller och mineral, nämligen litium, sällsynta jordartsmetaller, grafit, indium och kobolt där efterfrågan för några av dem förväntas växa med minst 300 procent fram till 2030.

⁹ Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020, s. 10.

¹⁰ Klimatambitioner och metallbehov – möjligheter för Sverige och svensk gruvnäring, Sve-min, 2021.

Figur 3 Förväntad global tillväxt av efterfrågan för utvalda metaller och mineral till 2050¹¹

Litium, sällsynta jordartsmetaller (REE), grafit, indium, kobolt bland de metaller och mineral med störst förväntad tillväxt till 2050. Koppar är den större metall som förväntas växa mest.



¹ Genomsnitt av framtidsprognoser från litteratursökning, i så stor utsträckning som möjligt kopplade till 2-gradersmålet och med cirkularitet.

² Osäkerheten reflekterar skillnaden i efterfråga mellan prognoser.

³ Sällsynta jordartsmetaller (Rare Earth Elements).

⁴ Platinagrupperns metaller.

Behovet av basmetallerna järn, aluminium, koppar, zink och bly bedöms växa med 25–175 procent, och koppar ökar mest. Ett exempel på kommande behov är att en elbil innehåller upp till fyra gånger så mycket koppar som en konventionell bil. Teknisk utveckling och möjlighet att i viss mån substituera metaller beroende på prisutveckling gör att metallbehovet i framtiden kan förändras. Ett exempel på detta är kobolt där flera batteritillverkare utvecklar alternativa metaller.¹² Ett bilbatteri till en vanlig medelstor modell kan innehålla ca 8 kilo litium, 35 kilo nickel, 20 kilo mangan och 14 kilo kobolt.¹³

Hastighet och omfattning av klimatomställning styr efterfrågan

Ambitionsnivån i klimatomställningen kommer att påverka efterfrågan av innovationskritiska metaller och mineral. EU har, jämfört med andra delar av världen, satt ambitiösa mål för klimatomställningen. EU ska nå klimatneutralitet till 2050 och sänka utsläppen med 55 procent till 2030. Detta gör att EU:s behov av metaller för klimatomställningen kommer att vara relativt sett högre än omvärldens.¹⁴

¹¹ Svemin-rapport 2021, s. 9.

¹² Svemin-rapport 2021.

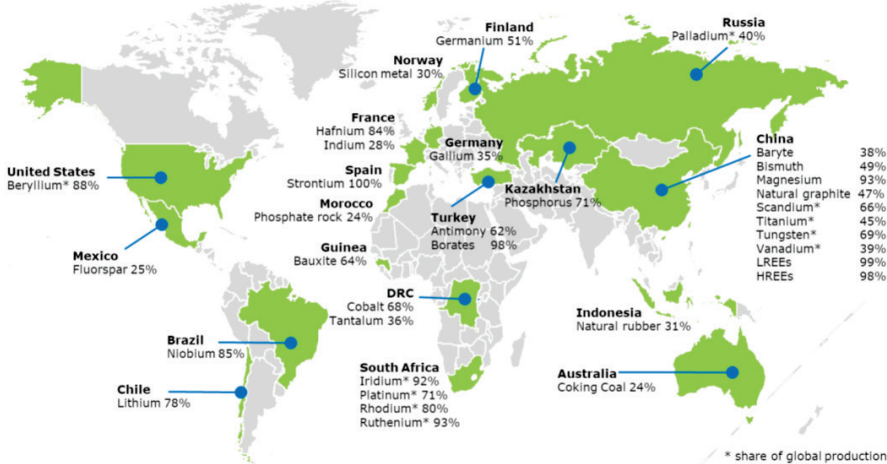
¹³ Electric cars and batteries: how will the world produce enough? Nature 596, s. 336–339, 2021.

¹⁴ Svemin-rapport 2021, s.16.

2.4 Förekomst av innovationskritiska metaller och mineral

Berggrunden innehåller varierande, men oftast låga halter av alla innovationskritiska metaller och mineral. Försörjningen av dessa är dock koncentrerade till vissa länder. Av figur 4 framgår de största leverantörländerna av innovationskritiska råmaterial till EU.¹⁵ Kina står för en stor andel av världens produktion av innovationskritiska metaller och mineral. Andra länder som har en stor andel av vissa innovationskritiska metaller och mineral är Brasilien, Demokratiska republiken Kongo, Ryssland, Sydafrika och USA.

Figur 4 De största leverantörländerna av innovationskritiska råmaterial till EU¹⁵

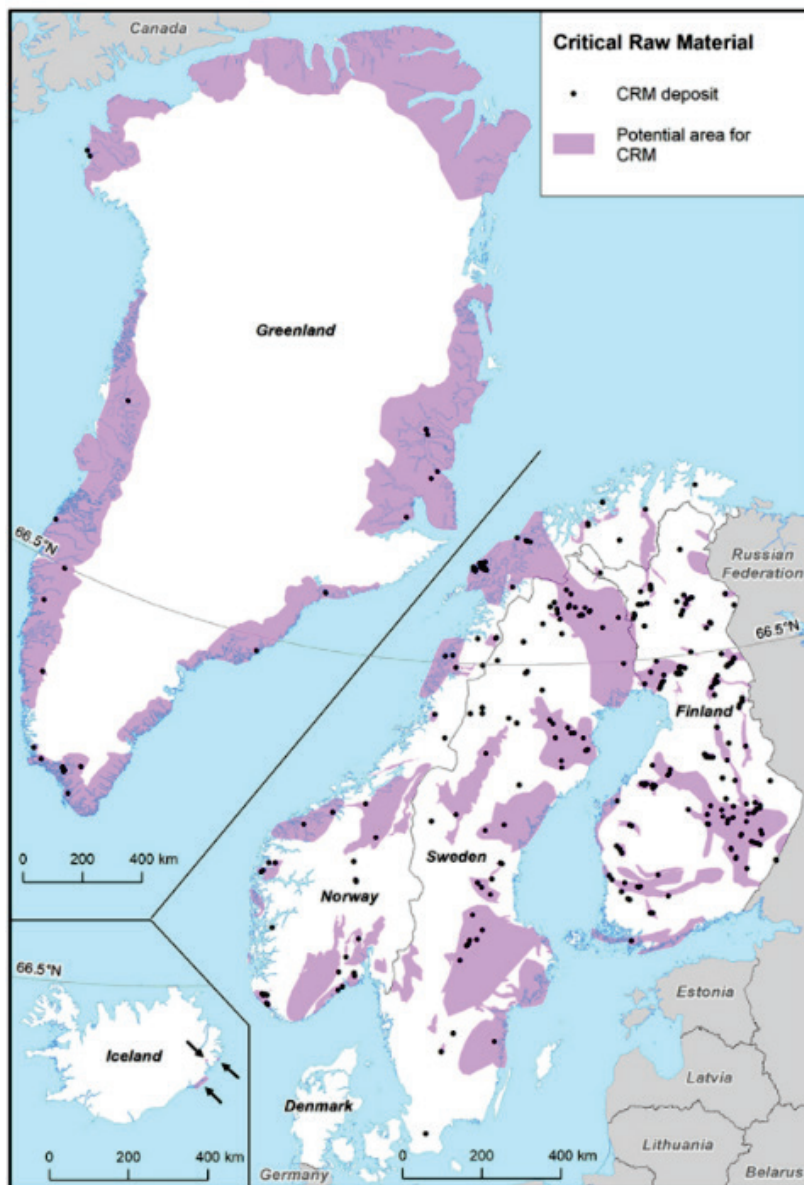


Sverige har geologisk potential för ett flertal innovationskritiska metaller och mineral

Sverige och övriga nordiska länder har geologisk potential för utvinning av ett flertal innovationskritiska metaller och mineral, och det finns flera malmberäknade fyndigheter där dessa ingår. Hösten 2021 redovisades en sammanställd rapport över brytning, känd och uppskattad förekomst samt bedömningar av potential för innovationskritiska metaller och mineral i de nordiska länderna.¹⁶ Överlag bedömdes potentialen för innovationskritiska metaller och mineral som relativt stor, men med betydande variationer, vad gäller geologiska förutsättningar och kunskapsläge. Rapportförfattarna bedömde att en inte obetydlig del av behovet av innovationskritiska metaller och mineral kan täckas via ny brytning av förekomsterna i de nordiska länderna (se figur 5).

¹⁵ EU-kommissionen, Resiliens för råvaror av avgörande betydelse – Att staka ut vägen mot ökad trygghet och hållbarhet, COM(2020) 474 final.

¹⁶ Nordic Innovation Report, 2021, s. 17.

Figur 5 Kritiska råmaterial i Norden¹⁷

SGU har bedömt att Sverige har geologisk potential för ett flertal innovationskritiska råmaterial och har visat flera malmberäknade fyndigheter där dessa råmaterial ingår. Fyndigheter har identifierats av sällsynta jordartsmetaller, grafit, kobolt, litium, nickel, platinagruppens metaller, titan och vanadin.

¹⁷ Fördelningen av kända mineraliseringar samt områden med förhöjd potential för kritiska råmaterial i Norden. Från Eilu m. fl. 2021.

Tillväxtanalys¹⁸ har analyserat hela värdekedjan från utvinning av primära råmaterial till nya miljö- och teknikinnovationer och funnit att litium, sällsynta jordartsmetaller, grafit, volfram och kobolt har förutsättningar för framväxt av hela produktionskedjor i Sverige. Förekomsterna har dock inte inneburit att de utvinns i Sverige, men det finns flera projekt på gång.¹⁹ I kapitel 3 redovisas mer i detalj förekomst av ett urval av innovationskritiska metaller och mineral som studerats i denna översikt samt exempel på forsknings- och utvecklingsprojekt i Sverige.

Olika faktorer som påverkar utvinningspotentialen

Det finns flera faktorer att beakta som påverkar utvinningspotentialen: geologiska, ekonomiska och legala/institutionella.²⁰

Geologiska faktorer

Tillgången till en given metall eller ett mineral kan inte baseras uteslutande på genomsnittligt innehåll i jordskorpan, utan den eller det måste finnas i mängder och halter som är ekonomiskt utvinningsbara. Förmågan för ett grundämne att koncentrera sig i malmkroppar är därmed en fundamental egenskap som möjliggör utvinning. Geologiskt förekommer många kritiska metaller oftast i låga halter i malmer tillsammans med basmetaller som t.ex. koppar och zink.²¹ Många kritiska metaller bildar sällan egna brytvärda mineral som motiverar gruvbrytning utan förekommer vanligtvis i mycket låga halter i malmer som bryts för andra metaller. Om de utvinns sker detta som biprodukt i senare steg i metallernas produktionskedja: i smältverk eller vid metallraffinering. I dessa fall är huvudmetallen (t.ex. koppar) den ekonomiska drivkraften för brytning och utvinning. Ofta kräver utvinningen sofistikerade metallurgiska processer som i sin tur kräver stora investeringar i utvinningskedjan.

Ekonomiska faktorer

Eftersom kritiska metaller ofta är biprodukter ger det en komplex dynamik mellan utbud och efterfrågan. Utbudet blir prisoelastiskt, dvs. att om efterfrågan och priset stiger så kommer inte produktionen via marknadskrafter att öka automatiskt. En ökad volym beror i stället på efterfrågan och produktion av huvudmetallen. Ytterligare en aspekt är att mineralprospektering sker i ett antal steg som kan ta flera år och där det krävs ett antal olika tillstånd samt betydande investeringar i bl.a. borrhningar och annat undersökningsarbete. Eventuell utvinning av biprodukten är således inte enbart beroende av gruvproduktionen av huvudmetallen utan är avhängig att utvinningen är ekonomiskt lön-

¹⁸ Tillväxtanalys Rapport 2017:03.

¹⁹ SGU 2018:05.

²⁰ SGU 2018:05 s. 13 f.

²¹ Det gäller särskilt gallium, germanium, indium och kobolt som förekommer med koppar och zink.

sam och att det finns teknologi på plats för att ta till vara biprodukten under något steg i metallproduktionen.²²

Institutionella faktorer

Flera studier²³ har pekat på att tillståndsprocesserna i Sverige är tidskrävande och innebär en utmaning för utvinning. En annan institutionell risk är bristen på acceptans hos allmänheten för ny gruvbrytning då olika intressen som miljöaspekter och alternativ markanvändning ofta kolliderar. Sverige tillhör en av de gruvregioner i världen där den sociala acceptansen är som lägst. Dessa faktorer innebär en osäkerhet för företag att besluta om investeringar i ny utvinning av de innovationskritiska metallerna. Här kan påpekas att regeringen har lämnat direktiv²⁴ åt en utredare att se över prövningsprocesser och regelverk i syfte att säkerställa en hållbar försörjning av innovationskritiska metaller och mineral från primära och sekundära källor. Av direktiven framgår vidare att en förutsättningslös analys ska göras av frågan om att utvinning ofta kan innebära betydande lokal påverkan på miljön och kan konkurrera med motstående markanvändningsintressen i berörda områden. Utredningen ska vara klar senast i oktober 2022.

2.5 Återvinning av innovationskritiska metaller

Innovationskritiska metaller kan även utvinnas ur sekundäravfall, huvudsakligen olika former av gruvavfall, samt via återvinning från produktion och i produkter som slutanvänts.

Återvinning av metall har goda förutsättningar ...

Metaller har goda förutsättningar för ett kretslopp eftersom de till skillnad från många andra material inte tappar i kvalitet när de används, mals ned, smälts eller löses upp. Eftersom metaller är grundämnen kan de hypotetiskt återanvändas gång på gång och ändå återfå sina ursprungliga egenskaper. Det finns därmed potential för återbruk och återvinning av metaller. Återvunna material kan dessutom utgöra viktiga bidrag för att minska både miljöpåverkan och importberoendet inom EU samt öka konkurrenskraften.

Det är vanskligt att ge en enhetlig övergripande bild av metallflöden i samhället, i synnerhet vad gäller återvinning. Flödena av metaller är komplexa och svåröverskådliga, inte minst genom att export och import i stor omfattning sker av både råvaror, produkter och avfall för återvinning. Den svenska metallproduktionen domineras helt av järn och stål samt koppar och ytterligare några s.k. basmetaller. Dessutom utvinns guld och silver, framför allt som biprodukter till kopparmalm och i samband med återvinning. Metaller som järn och

²² SGU 2018:05 s. 19.

²³ T.ex. Tillväxtanalys rapport 2018:02, s. 35 f.

²⁴ Dir. 2021:16.

koppar återvinns redan i stora mängder i dag; t.ex. baseras drygt 40 procent av Sveriges stålproduktion på skrot eller återvunnet stål och återvinningen av koppar motsvarar ca 54 procent av kopparanvändningen i Sverige.²⁵

Flera utredningar har analyserat förutsättningarna för återvinning av metaller att möta efterfrågan för att främja en cirkulär målsättning. Återvinning har stor betydelse, men bedöms inte kunna täcka efterfrågan. I en av de senaste översikterna med framtidsscenarioer framgår att även om återvinningsgraden maximeras kommer efterfrågan av primärmetaller till 2050 bara att minska med ca 15–26 procent.²⁶

Möjligheten att återvinna ett material varierar väsentligt och beror på många faktorer. Tekniska förutsättningar påverkar, såsom tillgänglig återvinningsteknik, priser på återvunnet material och insamlings- och behandlingskostnader. Dessa förutsättningar påverkas av produktdesign, såsom materialkombinationer, separeringsmöjligheter och materialkoncentrationer i varje enskild produkt liksom de totala volymerna och koncentrationerna i de avfallsströmmar som den uttjänta produkten samlas in i. Återvinningssystemen och den organisation och policy som stöder dem är i många fall utformade utifrån ett produktperspektiv och inte ett materialperspektiv (t.ex. producentansvaret för förpackningar, elektronik och fordon). Det har betydelse om materialet genereras som produktions- eller konsumtionsavfall. Produktionsavfall är generellt sett mer fördelaktigt att återvinna eftersom man har bättre kontroll över innehåll och kvalitet och inte heller har blandat det med annat avfall. I många fall kan produktionsavfall skickas direkt tillbaka till materialtillverkning i ett slutet kretslopp. Sammantaget gör dessa faktorer att möjligheten att återvinna skiljer sig åt såväl mellan materialen som mellan olika produkter som innehåller ett och samma material.²⁷

... men återvinningen av innovationskritiska metaller är begränsad

Trots förutsättningar att återvinna metaller oändligt många gånger är omfattningen begränsad. Andelen innovationskritiska metaller och mineral som återvinns från konsumentprodukter är generellt mycket låg, ofta bara några procent. Bristande lönsamhet är det främsta skälet. Det är huvudsakligen dyra metaller som enkelt kan demonteras som återvinns.²⁸

Innovationskritiska metaller och mineral finns ofta i låga koncentrationer i komplexa produkter, och återvinningstekniken är inte fullt färdigutvecklad. Förekomsten i produkter tenderar att utvecklas mot att mindre och mindre av dyrbara metaller finns i varje produkt. Detta innebär att återvinningen blir än mer komplicerad. Det innebär att ju mindre mängd metaller varje produkt innehåller, desto mindre återvinns totalt sett och desto mer hamnar i diverse

²⁵ Metaller – en ändlig resurs med oändlig potential, Naturskyddsföreningen, 2021.

²⁶ Svemin-rapport 2021, s. 19.

²⁷ Tillväxtanalys rapport 2018:02, s. 31.

²⁸ Marknadsbarriärer för återvinning av metaller, Tillväxtanalys, 2021.

avfallsströmmar som saknar metallåtervinning som en del i processen. Det är helt enkelt för dyrt och komplicerat att återvinna de små mängderna i varje produkt från dessa komplexa men ganska stora materialflöden.²⁹

Sekundäravfall – störst potential för sällsynta jordartsmetaller

Med moderna metoder och högre marknadspriser kan det vara möjligt att ur gruvavfall utvinna mineral och metaller som inte var möjliga att utvinna med äldre teknik. I gråberg och anrikningssand kan det finnas material som inte var ekonomiskt intressanta när malmen bröts men som efterfrågas i dag. Utvinning ur gruvavfall kan dessutom ge en miljövinna genom återanvändning och bortskaffande av potentiellt miljöfarligt avfall. SGU har gjort olika analyser av gruvavfall samt vilka metaller som kan utvinnas ur det. SGU har funnit³⁰ att det finns en hel del intressanta analysresultat av metallinnehåll i gruvavfall, men osäkerheten är stor om vilka mängder det finns totalt och om utvinning är ekonomiskt lönsamt. En iakttagelse är att för utvinning ur gruvavfall bedöms det finnas potential för sällsynta jordartsmetaller och fosfor.³¹

SGU samarbetar för närvarande med Naturvårdsverket i ett regeringsuppdrag³² för att öka möjligheterna till hållbar utvinning av mineral och metaller från sekundära resurser. I uppdraget ligger att, om möjligt kvantitativt, utvärdera olika gruvavfallsdeponiers potential som sekundära mineralresurser. Målsättningen är att i samband med slutrapporteringen av regeringsuppdraget presentera såväl kvalitativa som kvantitativa bedömningar av objektens potential som sekundära mineralresurser. För närvarande finns det inte någon kommersiell sekundärutvinning av innovationskritiska metaller och mineral, men det pågår forskningsprojekt och planeras för kommande projekt.³³

SGU anger i en delrapportering av uppdraget att ett svenskt genomförande av UNFC-klassificeringen³⁴ har potential att leda till mer exakta prognoser för exploatering och statlig resurshandling, men också till bättre möjligheter till en mer transparent resurshandling. Aggregerade data kommer att kunna belysa framtida utvecklingsfrågor om exploatering av gruvavfall samt att kunna bemöta eventuella praktiska hinder och hinder i lagstiftningen.³⁵

I kapitel 4 redovisas utmaningar och möjligheter att påverka återvinningen av innovationskritiska metaller och mineral.

²⁹ Ekberg, Retegan, s. 98, bil. 2.

³⁰ Critical Raw Materials in ores, waste rock and tailings in Bergslagen, SGU 2020:38.

³¹ Detta redovisas ytterligare i kapitel 3.3.3 Sällsynta jordartsmetaller.

³² Uppdrag att öka möjligheterna till hållbar utvinning och återvinning av mineral och metall från sekundära resurser, N2021/01038.

³³ Några av dessa redovisas i kapitel 3.

³⁴ FN:s klassificering av naturresurser, läs mer på <https://www.sgu.se/om-sgu/genomforda-evenemang/fns-klassificering-av-naturresurser-unfc/>.

³⁵ SGU RR 2021:03 s. 15.

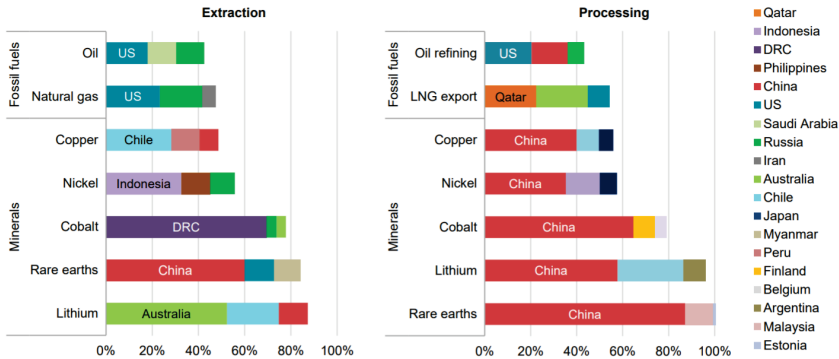
2.6 Globala värdekedjor koncentrerade till ett fåtal länder

Värdekedjan för metaller börjar med att mineral utvinns från gruvor. Dessa mineral behöver därefter förädlas i olika processer, bl.a. anrikning, metallutvinning och för vissa tillämpningar, tillsatser av legeringsämnen. Här används såväl primära råvaror som återvunna metaller (sekundära). Processtekniken är specialiserad och för vissa metaller skiljer sig processtekniken åt. De förädlade metallerna och mineralen kan sedan användas i tillverkning av komponenter, produkter och konstruktioner. Flödena av metaller är ofta komplexa och svåröverskådliga, inte minst genom att export och import sker av både råvaror, produkter och avfall för återvinning i stor omfattning.³⁶

Kina har en stor dominans i värdekedjan

Av figur 6 framgår hur värdekedjorna för ett antal innovationskritiska och andra metaller huvudsakligen fördelar sig mellan olika länder. En jämförelse görs även med värdekedjor för fossila bränslen. USA och länder i mellanöstern dominerar värdekedjan för fossila bränslen och Kina dominerar stort värdekedjan för flera innovationskritiska metaller och mineral. Om värdekedjorna istället redovisas för olika teknologier (figur 7) som är viktiga för den s.k. gröna omställningen framgår även här att Kina har en dominerande ställning.

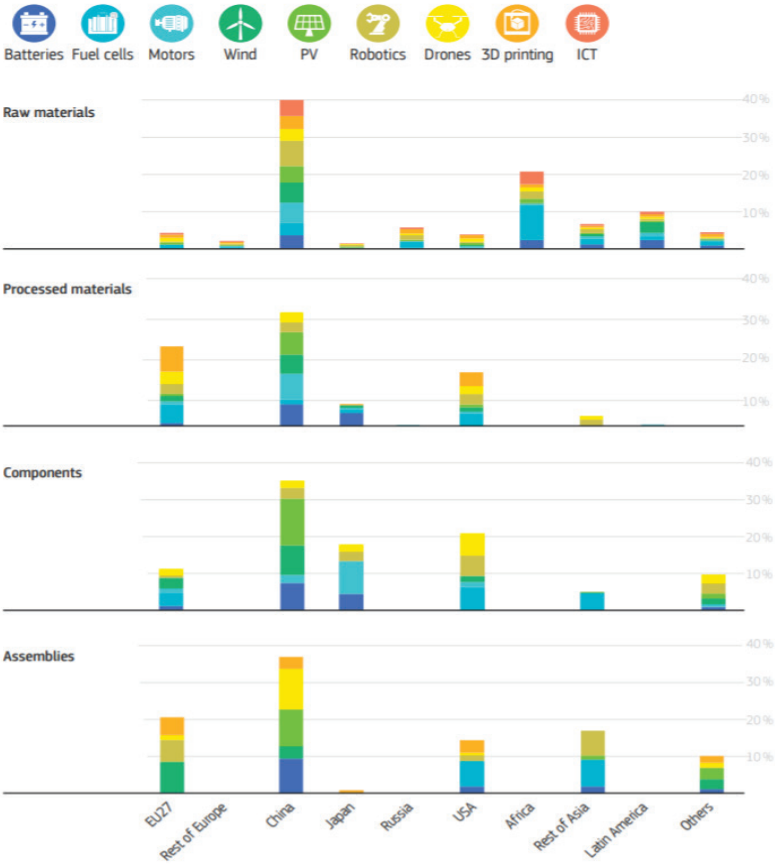
Figur 6 Tillverkningen av flera energimineral är idag mer koncentrerad geografiskt än vad som gäller för olja och naturgas³⁷



³⁶ Marknadsbarriärer för återvinning av metaller, s. 18 f, Tillväxtanalys, 2021.

³⁷ The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, 2020, s. 13.

Figur 7 Huvudsakliga leverantörer av råmaterial, processat material, komponenter och tillverkning för åtta teknologier³⁸



³⁸ Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020, s. 82.

3 Kunskapsläget i Sverige om innovationskritiska metaller och mineral

Sammanfattning: SGU tillgängliggör i dag viktig geologisk information. Enligt en av forskarrapporterna har SGU inte tillräckliga resurser för att möta ökande behov av högkvalitativ, grundläggande geologisk information som behövs. Vid våra lärosäten finns huvudsakligen endast en resursstark forskningsmiljö inom området innovationskritiska metaller och mineral. Det är mest på EU-nivå som forskning om återvinning bedrivs och i Sverige finns bara begränsad forskning, t.ex. en forskningsmiljö kring industriell materialåtervinning. I kapitlet sammanfattas forskarrapportens bedömning av potentialen för svensk utvinning – och möjlig återvinning – av ett urval metaller och mineral. Två av dem (vanadin och grafit) bedöms ha en betydande potential utifrån nuvarande kunskap, och för sällsynta jordartsmetaller finns det sannolikt en betydande potential.

Följande kapitel bygger huvudsakligen på de forskarrapporter som tagits fram inom ramen för forskningsöversikten. I de första avsnitten redovisas kunskapsläget översiktligt utifrån SGU:s verksamhet, följt av forskning vid universitet och högskolor, i Sverige och internationellt. Därefter redovisas mer i detalj kunskapsläget kring enskilda metaller och mineral som studerats i forskarrapporterna och avslutningsvis summeras i tabellform en bedömning av potentialen för utvinning utifrån det urval som redovisats.

3.1 SGU tillhandahåller geologisk information

SGU har enligt sin instruktion³⁹ till uppgift att tillhandahålla geologisk information för samhällets behov på kort och lång sikt. Myndigheten ska i detta syfte bedriva en behovsstyrd insamling av grundläggande geologisk information och förvalta och utveckla denna information i syfte att göra den tillgänglig och lätt att använda. Myndighetens underlag ska kunna användas som bas för forskning och identifikation av forskningsbehov. SGU har inga heltidsforskar-tjänster men adjungerade professorer på deltid. I sitt uppdrag ska SGU främja och stödja riktad grundforskning och tillämpad forskning inom det geovetenskapliga området samt medverka i internationellt samarbete och internationella utvecklingsprojekt. SGU fördelar även bidrag till riktad grundforskning och tillämpad forskning inom geovetenskap om ca 6 miljoner kronor årligen.⁴⁰

SGU gör uppdateringar länsvis över alla typer av mineralförekomster, och hittills har tolv län inventerats. Det finns en heltäckande databas

³⁹ 1997:1294.

⁴⁰ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 81, bil. 1.

(Fennoscandian Ore Deposit Database, FODD) för hela landet för de mer betydande mineralförekomsterna vilken även omfattar Norge, Finland och de nordvästligaste delarna av Ryssland. SGU ger också ut publikationen Mineralmarknaden där olika metaller behandlas utförligare. På senare år har SGU gjort riktade insatser med inventering av kritiska metaller i Sverige. Ett stort antal prospekteringsrapporter från arbeten utförda under 1900-talet av SGU, Swedish Geological AB (SGAB), Nämnden för statens gruvegendorar (NSG) och LKAB finns dessutom tillgängliga i digital form vid SGU.⁴¹

Fram till 1992, när minerallagstiftningen ändrades, bedrevs prospekteringen huvudsakligen av svenska staten.⁴² Därefter har prospekteringen bedrivits framför allt av privata företag. Bland privata företag har Boliden AB dominerat. Sedan 1992 har även mindre utländska prospekteringsbolag varit viktiga aktörer (s.k. juniorföretag). Det är bolag som ofta har sin hemvist i Kanada eller Australien och som saknar större eget kapital och därmed är beroende av extern finansiering. De har oftare satsat på projekt med förhoppningsvis snabbare resultat, vilket mestadels handlar om att försöka utveckla redan tidigare kända objekt samt metaller som visar på en starkt ökande prístrend. De svenska gruvbolagens prospektering har syftat främst till att förse befintliga anrikningsverk med råmalm och därför oftast skett i närområdet kring deras anläggningar och med fokus på de metaller som utgör deras huvudprodukter.⁴³

I en av forskarrapporterna framkommer att det för att stärka forskningen inom området finns behov av att ge SGU förutsättningar att kunna förse universitet och högskolor med högkvalitativ grundläggande geologisk information. Denna information är även väsentlig för prospekteringsföretag och det är huvudsakligen SGU som utför sådan kartläggning. Om SGU ges bättre förutsättningar för sådan geologisk information ger det, enligt forskarrapporten, i sin tur möjlighet till utökad grundforskning och tillämpad forskning inom området. I förlängningen ges också bättre förutsättningar att identifiera nya potentiella förekomster. Det är, enligt forskarrapporten, inte möjligt för SGU att möta detta behov med nuvarande resurser för geovetenskaplig forskning.⁴⁴

3.2 Forskning om innovationskritiska metaller och mineral

Ett flertal lärosäten i Sverige bedriver forskning om innovationskritiska metaller och mineral, men det rör sig mestadels om ett fåtal forskare per lärosäte som bedriver forskning om ett begränsat antal metaller och mineral inom delar av värdekedjan.

Den resursstarkaste forskningsmiljön i Sverige finns vid Luleå tekniska universitet (LTU) med ca 25 forskare som bedriver forskning relaterad till

⁴¹ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 56, bil. 1.

⁴² I form av SGU fram till 1982 och därefter genom Nämnden för statens gruvegendorar (NSG) och Swedish Geological AB (SGAB) samt LKAB.

⁴³ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 57, bil. 1.

⁴⁴ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 91, bil. 1.

innovationskritiska metaller och mineral längs hela värdekedjan (prospektering, malmkaraktärisering, brytning, utvinning, återvinning och miljöpåverkan). Forskning pågår vid LTU kring karaktärisering av innovationskritiska metaller och mineral i malmer och restprodukter i samarbete med gruvindustrin i alla Sveriges malmdistrikt. Det handlar exempelvis om förekomst, fördelning och halter av innovationskritiska metaller och mineral i malmmineral och i slagg, hur dessa beter sig i anrikningsprocesser, om de utgör en förorening eller framtida tänkbar biprodukt samt deras roll i malmbildningsprocessen. Analysmetodik för detektion av dessa små beståndsdelar av en malm utvecklas med hjälp av den senaste tekniken inom svepelektronmikroskopi, tomografi, laserteknik och synkrotronanalys (MAX IV). Ett nyligen avslutat EU-finansierat projekt har handlat om bl.a. sällsynta jordartsmetaller i olika värddmineral och procesströmmar i LKAB:s malmer⁴⁵. Andra frågor man forskar om är hur innovationskritiska metaller och mineral förekommer och rör sig vid vittring av gruvavfall och hur de påverkar omkringliggande vattendrag, men också hur de förekommer naturligt i vattendrag. Forskningen handlar då om att förstå hur dessa metaller rör sig naturligt i miljön för att öka kunskapen om deras beteende vid eventuell gruvbrytning.⁴⁶

Swedish Mining Innovation

Universitet, högskolor och forskningsinstitut har tillsammans med gruvbolag och teknikleverantörer gemensamt utvecklat en forsknings- och innovationsagenda för gruvindustri och metallutvinnande industri i Sverige – det strategiska innovationsprogrammet Swedish Mining Innovation (SMI)⁴⁷. SMI är en del av Vinnovas, Energimyndighetens och Formas satsning på strategiska innovationsområden. SMI syftar till att stärka centrum och kluster för forskning och innovation inom gruvindustri och metallutvinnande industri i Sverige och är den centrala noden för svensk gruv- och metallutvinnande forskning. SMI har olika inriktningar med bäring mot tillgången till innovationskritiska metaller och mineral, bl.a. malmkaraktärisering (kunskap om en mineralresurs), mineralteknik (hur ett mineral kan utvinnas) samt återvinning och metallurgi (tillvarata metaller i materialströmmar). En styrka som framkommit i utvärderingar av FoU-miljöer inom gruv- och metallbranschen är denna typ av samverkan mellan industrin och akademien som har funnits länge i Sverige. Samverkan bidrar bl.a. till att forskningen inom området har industriell relevans och skapar förutsättningar för nyttiggörande.⁴⁸ Vad gäller spetskompetens i svenska FoU-miljöer finns de inom flera ämnesområden t.ex. brytningsteknik, anrikningsteknik, metallurgi och miljö. Flertalet av de svenska styrkeområdena inom gruv- och mineralteknik bedöms bidra till en cirkulär ekonomi.

⁴⁵ Wanhainen m.fl. 2017.

⁴⁶ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 77, bil. 1.

⁴⁷ <https://www.swedishmininginnovation.se/sv/>.

⁴⁸ Se bl.a. Vinnova, Forskning inom gruv- och mineralområdet – En studie av styrkor och samverkan, 2017:01.

En stor del av forskningen bedrivs på EU-nivå – ofta om återvinning

Forskning på EU-nivå⁴⁹ utgörs till stor del av sammanställningar och kartläggningar av redan kända mineraliseringar med historiska data.⁵⁰ Ett exempel är Frame-projektet, som avslutades i oktober 2021 och har gett ökad kunskap om den geologiska potentialen av utvalda innovationskritiska metaller och mineral inom EU. Resultaten visar bl.a. att Sverige har förekomster av flera kritiska mineral och metaller när det gäller både primära och sekundära källor. Grafit, kobolt, litium, tantal och sällsynta jordartsmetaller är exempel på kritiska mineral och metaller där den geologiska potentialen i Sverige bedöms som god. Majoriteten av den forskning som EU via forskningsprogrammet Horisont 2020 finansierat sedan 2014 om innovationskritiska metaller kretsar kring återvinning, framför allt av magneter och batterier med fokus på sällsynta jordartsmetaller, men även av annat avfall, gruvornas restprodukter samt substitution. För att undersöka möjligheten till alternativa källor till innovationskritiska metaller bedrivs ett antal forskningsprojekt inriktade på djuphavsbrytning (s.k. deep sea mining) och asteroidbrytning (s.k. asteroid mining). Under Horisont Europa finns plattformen European Technology Platform on Sustainable Mineral Resources (ETP SMR)⁵¹, med fokus på att stötta innovation och företagande längs hela råmaterialvärdekedjan. Under Horisont Europa finns vidare EIT RawMaterials⁵², ett initiativ inom ramen för European Institute of Innovation and Technology. Plattformen omfattar drygt 120 parter från 22 europeiska länder, har ett av sina sex kontor i Luleå. I september 2020 lanserades initiativet Europeiska råvarualliansen (European Raw Materials Alliance, ERMA)⁵³ som ett led i EUs strategi för att skapa industriallianser. För närvarande drivs tre olika kluster inom ERMA, med fokus på batterivärdekedjan, magnetvärdekedjan samt högre utbildning. De flesta universitet i Europa med forskning inom gruvvärdekedjan har ett antal forskningsprojekt som inkluderar innovationskritiska metaller och mineral. Exempel på universitet och forskningsmiljöer i Europa med hög vetenskaplig produktion inom området är Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology (HIF)⁵⁴ och University of Exeter med Camborne School of Mines.⁵⁵

⁴⁹ Wanhainen, Martinsson, 2021, s. 81f, bil. 1

⁵⁰ <https://www.frame.lneg.pt/> och Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries.

⁵¹ <https://www.etpsmr.org/>.

⁵² <https://eitrawmaterials.eu/>.

⁵³ <https://erma.eu/>.

⁵⁴ <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=2937>.

⁵⁵ <http://emps.exeter.ac.uk/csm/research/critical-metals/>.

Svensk forskning om återvinning är begränsad

Antalet forskningsmiljöer i Sverige där återvinningsforskning om innovationskritiska metaller utförs med mål att utveckla fungerande processer är mycket litet (en miljö finns vid Chalmers)⁵⁶. Detta gäller även den inhemska finansieringen av dylika projekt. En majoritet av befintlig forskningsfinansiering går till systemstudier, snarare än utveckling av processer.⁵⁷ Forskningsinstitutet Rise⁵⁸ och Swerim⁵⁹ bedriver viss FoU om innovationskritiska metaller och mineral. Den handlar om utvinning och återvinning av innovationskritiska metaller och mineral från avfall samt om livscykelanalys och spårbarhet.⁶⁰

3.3 Behovet av mer grundläggande forskning är stort

Det finns många potentiella fyndigheter i Sverige, och brytning av annat än basmetaller, järn och guld skulle kunna vara en framtida möjlighet. Däremot har det inte gjorts några större vetenskapliga undersökningar av majoriteten av de här fyndigheterna i modern tid. Sedan den statliga prospekteringen upphörde för 30 år sedan har prospekteringen av den svenska berggrunden fått ett annat fokus. Tidigare statlig prospektering bedrevs i större regioner med syftet att hitta nya uppslag som senare skulle kunna följas upp med mer detaljerade insatser. Denna typ av prospektering bedrivs i stort sett inte längre. Nuvarande prospektering sker till största delen omkring redan kända mineraliseringar, vilket medför att det genereras få nya objekt och att stora områden fortfarande aldrig är undersökta, annat än översiktligt. Enligt en av forskarrapporterna är den samlade omfattningen av forskning vid svenska universitet och högskolor inom området innovationskritiska metaller och mineral, i en värdekedja som innefattar prospektering och utvinning av juvenilt material, utvinning ur gruvornas restprodukter samt miljöaspekter av detta, relativt begränsad. Av forskarrapporten framgår att det finns en otillräcklig berggrundsgeologisk och malmgenetisk forskningsuppbyggnad i Sverige vad gäller innovationskritiska metaller och mineral samt kunskapsluckor längs hela värdekedjan.⁶¹

Den samverkan som i dag sker kring forskning och innovation mellan universitet och högskolor, gruvbolag och teknikleverantörer är en internationell förebild, med möjlighet till forskningsfinansiering från t.ex. SMI. Svensk gruvindustri ligger i framkant vad gäller grön omställning. Forskning om metaller och mineral som inte ingår i de större företagens rådande strategier, vilket gäller de flesta innovationskritiska metaller och mineral, är dock begränsad i Sverige. Den forskning industrin prioriterar och bedriver i samverkan med akademien bedöms vara i världsklass, men den forskning och

⁵⁶ Industriell materialåtervinning, <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/chem/Forskning/energimaterial/forskningsomr%C3%A5den/imr/Sidor/Industriell-materialatervinning.aspx>.

⁵⁷ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 98, bil. 2.

⁵⁸ <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/expertiser/innovationskritiska-metaller-ochmineral>.

⁵⁹ <https://www.swerim.se/cases/utvinn-vanadin-ur-stalslagg>.

⁶⁰ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 81, bil. 1.

⁶¹ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 89, bil. 1.

kunskapsuppbyggnad som industrin inte prioriterar i dagsläget är svår att få finansiering för och utförs därför i stort sett inte. Större företag som LKAB och Boliden AB undersöker förekomst och möjlig utvinning av innovationskritiska metaller och mineral i sina restprodukter, ofta i samarbete med universiteten, men prospekterar inte efter dessa metaller. Forskning utgår ofta från vad de stora företagen är intresserade av i dagsläget. Utifrån företagets prioriteringar, vilket mestadels är en mer hållbar och kostnadseffektiv utvinning av huvudprodukter, bedrivs marginellt med forskning om kunskapsuppbyggnad i fråga om innovationskritiska metaller och mineral i den svenska berggrunden.⁶²

Forskningsfinansieringen ställer oftast krav på en hög andel medfinansiering från industrin och/eller minst två företag. Längs värdekedjan, i synnerhet i prospekteringsstadiet, råder hård konkurrens mellan företag, och det kan vara svårt att övertyga två företag att delta i ett och samma forskningsprojekt. Det rör sig mestadels om mindre prospekteringsföretag som ofta inte har medel att skjuta till och som inte själva driver en kunskapsutveckling. Som tidigare nämnts är den svenska berggrunden i dagsläget inte kartlagd i en sådan utsträckning att det finns en heltäckande bild av berggrundens sammansättning, och det finns stora områden med endast översiktlig kunskap. För säkrare slutsatser om potential till inhemsk produktion av nya metaller krävs kunskapsuppbyggnad mer i detalj om kända fyndigheter och berggrund, i synnerhet utanför dagens aktiva gruvområden.⁶³

3.4 Tillgång till och potential för ett urval metaller och mineral

Följande avsnitt bygger på de forskarrapporter som tagits fram inom forskningsöversikten. Redovisningen utgår från urvalet av metaller och mineral i underlagsrapporterna. Där framgår kunskapsläget, i förekommande fall exempel på forskningsprojekt samt exploateringsprojekt och det görs en bedömning av potentialen för brytning och i vissa fall återvinning.

Allmänt om kunskapsläget kring det redovisade urvalet

Ett stort antal vetenskapliga artiklar om malmfyndigheter har tidigare publicerats av forskare vid svenska universitet och högskolor samt av statsgeologer vid SGU. Dessa varierar från detaljerade mineralogiska arbeten på specifika fyndigheter till generella beskrivningar av enskilda fyndigheter, översiktliga studier av en speciell malmtyp och generella karaktärer av fyndigheter i ett visst malmdistrikt. Fokus har huvudsakligen varit på de viktigare svenska malmtyperna innehållande järn, koppar, zink, bly, silver och guld, och endast undantagsvis omfattat andra typer av metallfyndigheter inkluderande de flesta

⁶² Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 90, bil. 1.

⁶³ Svemin-rapport 2021, s. 25.

av de kritiska metallerna. Någon teknisk-ekonomisk aspekt av dessa metaller, eller potentialen att hitta ekonomiskt betydande fyndigheter, lyfts dock sällan fram i de vetenskapliga arbetena.⁶⁴

Bedömningen av potential för utvinning av innovationskritiska metaller och mineral i Sverige baseras på fakta om såväl kända fyndigheter som möjligheten till nyfynd. Kunskapen om kända fyndigheter utgår från tidigare undersökningar, och bedömningen av ekonomisk potential är baserad på uppgifter om halter och tonnage där dessa sätts i relation till vad som internationellt anses brytvärt, men även med hänsyn till befintlig infrastruktur i form av främst anrikningsverk. Mindre förekomster kan sällan uppnå tillräcklig lönsamhet om inte ett flertal liknande fyndigheter kan utnyttja ett gemensamt anrikningsverk eller ett för ändamålet lämpligt anrikningsverk redan finns i området.⁶⁵

Tidsperspektivet för att påbörja produktion är avhängigt vilket stadium ett projekt befinner sig i. I Sverige finns flera projekt där mineralresurser är bekräftade och i vissa fall även har bearbetningskoncessioner beviljades. Dessa projekt kan vid beviljandet av nödvändiga miljötillstånd ganska snabbt gå i produktion (3 till 5 år) om lönsamhetsstudierna ger ett positivt utfall. Projekt som ligger i en tidigare fas och saknar bearbetningskoncession har längre startsträcka (5 till 10 år) till produktion, och för nya fyndigheter som eventuellt kan bli resultatet av prospektering kan en eventuell produktion ligga minst 10 till 20 år framåt i tiden. Långa handläggningstider kan därtill bidra till att försena projekt eller försvåra deras finansiering.⁶⁶

3.4.1 Kobolt

Den största produktionen av kobolt sker i det centralafrikanska kopparkoboltbältet. Kobolt utgör där ofta en biprodukt vid kopparutvinningen. Kongo står för ca 70 procent av världsproduktionen. Förutsättningarna inom EU är inte särskilt goda utifrån nu kända förhållanden att få en inhemsk koboltproduktion av någon betydelse (låghaltiga och mestadels små fyndigheter). En småskalig produktion av kobolt har tidigare skett i Sverige, men några mer betydande koboltfyndigheter är inte kända och endast begränsade prospekteringsinsatser och forskning inriktade på kobolt har hittills gjorts.⁶⁷ Endast Finland har en viss produktion av kobolt.⁶⁸ Möjligheten att genom riktad prospektering påträffa ekonomiska koboltfyndigheter bedöms som relativt liten. Vid ett långsiktigt högre pris kan intresset för prospektering öka.

Återvinningsgraden (end of life recycling rate) för kobolt är 35 procent. Det relativt höga värdet beror främst på att kobolt används i så stor utsträckning i batteriapplikationer och den befintliga avfallslagstiftningen som kräver

⁶⁴ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 56, bil. 1.

⁶⁵ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 83, bil. 1.

⁶⁶ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 83, bil. 1.

⁶⁷ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 84, bil. 1.

⁶⁸ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 61 f., bil. 1.

insamling av uttjänta batterier. Fortfarande hamnar dock mycket av avfallet av kobolt i t.ex. deponi.⁶⁹

Återvinning av kobolt från batterier är en välutvecklad sektor med många nationella och internationella (europeiska) projekt av vilka de flesta har nått en hög mognadsnivå när det gäller återvinning av bilbatterier.⁷⁰ I Sverige har forskning om återvinningen av bl.a. kobolt mestadels från förbrukat batteriavfall bedrivits vid t.ex. Chalmers, vilket bl.a. lett till det framgångsrika projektet Revolt⁷¹ där Northvolt lyckats ta fram en ny battericell från återvunna batterier. Även nickel, mangan och litium återvinns i projektet. Målet för Northvolt är att hälften av alla battericeller 2030 ska komma från återvunnet material. Andra batteriåtervinningsprojekt finns vid Kungliga Tekniska högskolan (KTH)⁷², Uppsala universitet genom Centrum för Svenska batterier (Base)⁷³, där målet är att främja batteriforskningen såväl som återvinningen samt Swerim genom NEXT-LIB-projektet⁷⁴ som syftar till återvinning av litiumjonbatterier, där kobolt också är en av komponenterna.

3.4.2 Litium

Det finns betydande kunskap om litiumpegmatiter i Sverige. Utifrån tidigare kunskapsläge och litiumpriser är ingen redan känd fyndighet av ekonomiskt lönsam. Det ökade behovet av litium de senaste tio åren och det därmed stigande priset har resulterat i en förnyad prospektering efter litium i Sverige där flera aktörer har belagt kända fyndigheter med undersökningstillstånd och utfört vissa förnyade undersökningar. Litiumpriset fortsätter att öka i snabb takt. Prisökningen kan härledas till efterfrågan på elbilar och därmed på batterimetaller. Enligt SGU:s marknadsöversikt i januari 2022 når priserna rekordnivåer.⁷⁵

Det har bedrivits en omfattande prospektering efter litium inom EU med avsikt att förse batteriindustrin med råvara. Ett flertal aktörer har varit inriktade på litiumpegmatiter i framför allt Portugal, Spanien, Österrike, Irland, Finland och Sverige. Litiumfyndigheter är under utveckling i Finland⁷⁶ i en liknande berggrund som den som finns i mellersta och södra Norrland. De mest lovande områdena utgörs av de östra delarna av Norrland från Gästrikland upp till Norrbotten där flera mindre förekomster redan är kända.⁷⁷

Det finns betydande luckor för att kunna närma sig god återvinning av litium ur kemisk synvinkel och mer forskning behövs för en hållbar och effektiv återvinning. Det finns plats för förbättringar i redan befintliga processer i laboratorie- eller pilotskala och säkerheten i förbehandlingen kan fortfarande

⁶⁹ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 99, bil. 2.

⁷⁰ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 99 f., bil. 2.

⁷¹ <https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>.

⁷² <https://www.kth.se/sv/ket/resource-recovery/recycling-of-batteries-1.938983>.

⁷³ <https://www.batteriessweden.se/>.

⁷⁴ <https://www.swerim.se/en/next-lib>.

⁷⁵ <https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2022/februari/metallprisernas-utveckling-i-januari/>.

⁷⁶ Se t.ex. <https://www.di.se/nyheter/finlandskt-dromfynd-ska-fralsa-northvolt/>.

⁷⁷ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 58, bil. 1.

vara ett problem för en storskalig återvinning på grund av den höga energitätheten och riskerna för explosion och brand.

Den snabba ökningen av apparater som innehåller små litiumbatterier leder till ökad insamling av sådana batterier men det segmentet ses inte som en pålitlig eller önskvärd källa för återvinning. Skälet är att dessa batterier återfinns i en uppsjö av storlekar och kemier vilket gör effektiv sortering besvärlig. Metoder som baseras på total smältning föredras därför ofta vilket resulterar i en begränsad effektivitet i litiumåtervinningen. Snarare är de större batterier från elfordon mer intressanta på grund av större mängd litium. För att övervinna denna lucka har flera projekt ägnat sig åt att hantera både små litiumbatterier och större batterier från elbilar.⁷⁸

Den rapporterade återvinningsgraden för litiumbatterier är 5 procent. Globalt finns det över 50 företag involverade i återvinning av litiumbatterier där Kina har den största marknadsandelen. Konkurrensen bland återvinningsföretagen om batterier som ska återvinnas är enligt uppgift mycket hög och varje cellkemi har positiva marknadsvärden i Kina. Detta tyder på att det finns en efterfrågan och att återvinning kan vara ekonomiskt genomförbar.⁷⁹

När det gäller forskningsverksamheten i Sverige är den snarlik för litium och kobolt när det gäller batterier som råmaterial. Verksamheter pågår på flera ställen, varav några som kan nämnas är Chalmers⁸⁰, särskilt Revolt-projektet⁸¹, KTH:s litiumåtervinning i batteriåtervinningsprojekt⁸², Uppsala universitet med Centrum för Svenska batterier (Base)⁸³ där målet är att främja batteriforskningen såväl som återvinning. Batteriprojekten på Swerim genom t.ex. NEXT-LIB-projektet⁸⁴ som syftar till återvinning av litiumjonbatterier. En mer omfattande analys av tidigare och nuvarande återvinning av batterier (och implicit litium) i Sverige finns i rapporten State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – A research review, av Hans Eric Melin från 2019. En annan rapport⁸⁵ belyser återvinning av batterier i Norden per land ur ekonomisk synvinkel. Återvinning av litium från olika strömmar (batterier, gruvidrift etc.) har genomförts inom Europa och under Europeiska unionens paraply i projekt som sträcker sig från tidiga program till det nuvarande och samlas på plattformen Cordis. De flesta av projekten har, precis som för kobolt, startat som grundforskningsprojekt och några av dem har nått mognad eller marknadsintroduktion. För närvarande kan 67 projekt som handlar om återvinning av litium identifieras.⁸⁶

Litiumextraktion, användning och återvinning har nått en mognad på bara några år och drivs utifrån behov i global skala. Den snabba utvecklingen av elektriska fordon som drivs av litium-jon-batterier har drivit på utvecklingen

⁷⁸ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 103, bil. 2.

⁷⁹ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 103, bil. 2.

⁸⁰ <https://www.metalliskamaterial.se/sv/forskning/mmm2021-1-nybat/>.

⁸¹ <https://northvolt.com/articles/first-cell/>.

⁸² <https://www.kth.se/sv/et/resource-recovery/recycling-of-batteries-1.938983>.

⁸³ <https://www.batteriessweden.se/>.

⁸⁴ <https://www.swerim.se/en/next-lib>.

⁸⁵ Energimyndigheten, 2021.

⁸⁶ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 104 f., bil. 2.

av återvinning redan vid tillverkningen. När det gäller denna typ av återvinning kan designforskningen kopplas till återvinningen på ett produktivt sätt.⁸⁷

Stena Recycling⁸⁸ bygger med start hösten 2021 en anläggning i Halmstad för återvinning av alltifrån batterier från eldrivna bilar till batterier från olika typer av konsumentprodukter. Målet är att återvinna 95 procent av ett litiumjonbatteri och att samla in batterier från hela Europa till anläggningen i Halmstad. Därigenom ska anläggningen bli en ledande batteriåtervinnare i Europa.

3.4.3 Sällsynta jordartsmetaller

Sällsynta jordartsmetaller (rare earth elements, REE) används i många olika tillämpningar men mestadels i små kvantiteter. På senare tid har efterfrågan ökat kraftigt då vissa av dem har fått ökad användning i superstarka magneter i elmotorer och generatorer och flera typer av högteknologiska tillämpningar. Pegmatiter med REE-haltiga mineral har varit kända i Sverige sedan lång tid och delvis varit föremål för närmare mineralogiska studier. SGU har gjort en omfattande genomgång av kända objekt med REE.⁸⁹

En betydande prospektering efter REE skedde i främst statlig regi under 1980-och 1990-talen. Det resulterade i en stor mängd uppslag, varav endast några få blev föremål för närmare undersökning. Prisbilden för REE har efter en kraftig uppgång 2011–2012 legat relativt stabilt tills nyligen då särskilt neodym och praseodym (vilka båda används i superstarka magneter) visat en stark ökning, vilket kan vara början på en långsiktigt högre prisnivå. Det kan leda till ett ökat intresse för prospektering av REE och möjlighet till nyfynd i flera delar av landet genom uppföljning av gamla uppslag från tidigare prospektering, men man kan även att helt nya fyndigheter påträffas och då kanske främst i Malmfälten.⁹⁰

LKAB och Boliden AB planerar inom ramen för industrisatsningen Reemap⁹¹ att anlägga en industripark i Luleå för att utvinna pyritkoncentrat från Aitikgruvan i Gällivare som senare ska förädlas till fossilfri svavelsyra. Svavelsyran ska användas i LKAB:s processer för utvinning av REE och fosfor. Svavelsyraproduktionen kommer i sin tur att generera överskottsvärme som kan användas i industriparken. Från restprodukter innehållande pyrit och apatit från de båda företagens verksamheter i Gällivare och Kiruna kommer således svavelsyra och fosfor, sällsynta jordartsmetaller och gips att produceras.

Grängesberg Exploration Holding AB har liknande planer för utvinning av apatit från sandmagasinen från tidigare järnmalmsbrytning i Grängesberg. Boliden AB har bl.a. utfört geometallurgiska studier på möjligheten att utvinna REE-mineral (monazit) som biprodukt ur anrikningsavfall från

⁸⁷ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 103, bil. 2.

⁸⁸ <https://www.stenarecycling.se/nyheter/stena-recycling-kraftsamlar-kring-batteriatervinning/>.

⁸⁹ Rare earth elements distribution, mineralisation and exploration potential in Sweden, SGU 2019.

⁹⁰ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 84 f, bil. 1.

⁹¹ <https://ree-map.com/sv/>.

Kankbergsgruvan i Skelleftefältet.⁹² Denna möjlighet undersöktes tillsammans med ett tiotal andra gruvavfall inom det internationella projektet ENVIREE⁹³. Där var slutsatsen att resterna från brytningen vid Kankberg var speciellt lämpade på grund av både fysisk och kemisk form.

Norra Kärr är en relativt stor fyndighet, som om den visar sig vara teknisk-ekonomiskt och miljömässigt möjlig att exploatera kan bli en viktig producent av REE inom EU. Leading Edge Materials⁹⁴ har utfört anrikningstester och metallurgiska tester för utvinning av REE. Fyndigheten har fördelen av att inte innehålla förhöjda halter av uran och torium men har en relativt låg halt av REE som dessutom uppträder som en mindre beståndsdel i mineralet eudialyt. Det innebär att ny teknik måste utvecklas för extraktion av REE och att en stor mängd koncentrat måste processas. Fyndigheten är relativt låghaltig och värld-mineralet har inte tidigare utgjort råvara för REE i andra delar av världen och kräver syralakning i utvinningsprocessen. Projektet har mött starkt motstånd från bl.a. lokal opinion. En ansökan om bearbetningskoncession har beviljats, men därefter överklagats till regeringen. 2021 avslog Bergsstaten ansökan.⁹⁵

Forskning om förekomsten av sällsynta jordartsmetaller i Norra Kärr presenterades i en doktorsavhandling november 2021⁹⁶. Avhandlingen ger nya insikter i Norra Kärrs geologiska ursprung. Det konstateras att Norra Kärr är en av Europas största förekomster, men inga ståndpunkter tas till frågan om brytning med dess konsekvenser.

När det gäller återvinning av REE ur produkter bedöms den vara mycket begränsad. Mindre än 5 procent av REE återvinns idag. På grund av den stora variationen i produkter som innehåller REE och deras kemiska egenskaper är det inte ovanligt att pyrokemiska metoder används på materialen i stort och REE förloras då ofta i slaggfaser. Försök att använda slagg i efterföljande hydrokemisk återvinning finns men har inte tillämpats framgångsrikt i större skala. Det finns idag flera hinder som begränsar återvinningen av REE på den breda globala marknaden. Detta gäller både utveckling av effektiva kemiska processer och insamling av relevanta materialströmmar som är enhetliga nog för att en mer specifik återvinning ska kunna genomföras. Ett stort problem med återvinningen är den flyktiga prisbilden. Eftersom världsmarknaden domineras av en aktör fluktuerar priserna kraftigt varför en mer långsiktig insats för processutveckling ter sig osäker. Återvinningsforskningen om REE på grundnivå är en välrepresenterad sektor med flera nationella och internationella eller europeiska projekt⁹⁷. Några av dem har nått relativt långt, teknisk

⁹² Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 71 f., bil. 1.

⁹³ <http://www.enviree.eu/home/>.

⁹⁴ <https://leadingedgematerials.com/projects/>.

⁹⁵ Leading Edge Materials Updates on Norra Kärr Mining Lease Application, 5 maj 2021.

⁹⁶ <https://www.gu.se/nyheter/nya-ron-om-forekomsten-av-sallsynta-jordartsmetaller-utan-for-granna>.

⁹⁷ Se t.ex. ”Ny metod utvinnet sällsynta jordartsmetaller ur avfall” i Ny Teknik den 11 februari 2022, <https://www.nyteknik.se/innovation/ny-metod-utvinnet-sallsynta-jordartsmetaller-ur-avfall-7028676>.

mognadsgrad 6 -7 (där 9 är max), men har inte i någon egentlig mening tagits upp av återvinningsindustrin av anledningar som angetts ovan.⁹⁸

3.4.4 Vanadin

Vanadin används huvudsakligen i stålindustrin som legeringsmetall men har på senare tid även fått användning som batterimetall. Det finns ett flertal kända vanadinförekomster i Sverige av en storlek som om de visar sig vara ekonomiskt och miljömässigt brytbara skulle kunna medföra en betydande produktion av vanadin. Flertalet av dessa fyndigheter saknar dock tillräcklig geologisk och geometallurgisk information för att det ska gå att avgöra deras ekonomiska potential. Flera av dem ligger också i miljömässigt känsliga och delvis skyddade områden. En mycket stor potentiell resurs för vanadinproduktion är i alunskifferar i framför allt Jämtland och Skåne men även på andra platser i Sverige. För att utvinna metallerna krävs lakning med syror (hydrometallurgi) och de miljömässiga aspekterna vid brytning av alunskiffer är inte särskilt väl kända. Uraninnehållet utgör också ett problem. Om dessa fyndigheter kan nyttjas på ett ekonomiskt, tekniskt och miljömässigt acceptabelt sätt, vilket är en stor utmaning, utgör de vanadinförekomster av världsklass och skulle kunna göra Sverige till en av de mest betydande vanadinproducenterna i världen. Ingen primär produktion av vanadin sker inom EU i dagsläget, men metallen utvinns ur slagg i flera länder. Förutsättningarna för en ekonomisk produktion av vanadin är troligen goda i Finland liksom i Sverige om marknadspriserna är tillräckligt höga.^{99 100}

Återvinningsgraden för vanadin är god och beräknas till 44 procent.¹⁰¹ Critical Metals¹⁰² planerar att använda biprodukter från SSAB:s stålproduktion för att utvinna högre vanadin för användning i energilagringssystem och speciallegeringar.

3.4.5 Grafit

Grafit har många användningsområden på grund av flera unika egenskaper, bl.a. god elektrisk ledningsförmåga vilket gör att den kan användas till elektroder i batterier. Världens behov av grafit väntas öka de närmaste åren, bl.a. för användning i batterier. Omkring 68 procent av världens tillgångar av grafit finns i Kina, följt av Indien och Brasilien på 14 respektive 7 procent. Mindre mängder grafit har tidigare brutits i Sverige och en relativt omfattande prospektering har bedrivits. Det finns ett flertal mer betydande förekomster påvisade men de är sällan närmare undersökta. Prisbildningen för högre grafitprodukter har visat en positiv utveckling sista tiden vilket ger bättre förutsättningar för befintliga projekt liksom stimulans för ytterligare prospektering.

⁹⁸ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 110, bil. 2.

⁹⁹ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 65, bil. 1.

¹⁰⁰ Nordic Innovation Report, 2021, s. 80.

¹⁰¹ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 100, bil. 2.

¹⁰² <https://criticalmetals.eu/svenska/vanadium-recovery.php>.

Grafitförekomsterna i Malmfälten i Norrbotten är mycket stora och internationellt sett med en mycket hög grafithalt. Mestadels är grafiten tämligen finkornig vilket medför vissa anrikningstekniska och metallurgiska utmaningar för att få en grafitprodukt av hög kvalitet. Om detta kan uppnås finns några av världens största och rikaste grafitförekomster i Malmfälten. Ingen grafit bryts för närvarande inom EU men mindre mängder produceras i Norge.¹⁰³

Talga Resources¹⁰⁴ genomför provbrytning av grafitfyndigheten i Nunasvaara, i Vittangi samt metallurgiska försök med avsikt att med förnybar energi producera anoder till batterier. Om projektet förverkligas blir det den största grafitgruvan utanför Kina och kan stå för en femtedel av den beräknade efterfrågan i Europa 2025. Förädlingen planeras att ske i Luleå med start 2024.¹⁰⁵

3.4.6 Indium

Indium gör dagens datorer och smartmobiler möjliga. Mer än hälften av allt indium används som indium-tennoxid till plattskärmar i datorskärmar, mobiltelefoner och tv-apparater, men också i lödningar och solceller. Efterfrågan på indium förväntas fortsätta att växa, mest på marknaden för solceller och LED-produkter.

Ingen brytning av indium har förekommit i Sverige och prospektering har heller inte förekommit. Förutsättningar och potential för utvinning inom landet är i stort sett obefintliga eftersom metallen utvinns som biprodukt i zinksmältverk.

Länder som producerar indium-tennoxid har ökat återvinningsgraden av sin produktion på grund av högre efterfrågan på produkter innehållande indium, och det pågår viss indiumåtervinning från uttjänta produkter (Tyskland), men på en mycket låg nivå, mindre än 1 procent. För närvarande finns det inga effektiva och ekonomiskt attraktiva separations- eller raffineringstekniker för att återvinna indium från displayenheter. I displayer, som innehåller den största andelen av alla applikationer används indium i mycket små mängder och förekommer i en s.k. sandwichblandning, vilket försvårar återvinningen. Halten av indium som finns i LCD-skärmar på olika enheter varierar från 3 ppm i smartmobiler till 660 ppm i mer traditionella mobiltelefoner. Detta innebär att indiumet i många återvinningsprocesser går förlorat.

En begränsning för återvinning av indium är att det genererar stora mängder avloppsvatten i hydrometallurgiska och kemiska processer, vilka kräver hög tillförsel av kemiska ämnen. Det finns en risk att processvattnet förorenas med giftiga tungmetaller, vilket kan utgöra ett hot mot miljön. Rening av detta vatten kan naturligtvis genomföras men ökar då kostnaden och påverkar lönsamheten väsentligt. Den låga mängden indium i elektroniskt avfall och den låga insamlingsgraden internationellt har delvis avskräckt projekt som enbart

¹⁰³ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 68, bil. 1.

¹⁰⁴ <https://www.talga.se/talga-ab-produktion/>.

¹⁰⁵ "Bara Kina slår grafitgruvan i Vittangi", Dagens industri den 30 januari 2021.

handlar om återvinning av indium. I stället undersöks metoder där indium återvinns tillsammans med en grupp metaller såsom gallium och sällsynta jordartsmetaller från t.ex. solceller vilket bedöms vara mer ekonomiskt genomförbart. Vid Chalmers har sedan länge flera återvinningsprojekt bedrivits och inom Cordis (Horisont Europa) finns ett tjugo-tal forskningsprojekt.¹⁰⁶

3.4.7 Nickel

Nickel har huvudsakligen använts som legeringsmetall i stålindustrin men på senare tid även i batterier till elfordon. Nickel tillhör formellt inte de uppräknade innovationskritiska metallerna, men har ändå tagits med i översynen eftersom det har stor betydelse för flera teknologier inom den gröna omställningen, t.ex. elfordon, energilagring och bränsleceller där efterfrågan bedöms öka starkt. Enligt SGUs marknadsöversikt nådde priserna på nickel rekordnivåer i januari 2022¹⁰⁷.

Relativt omfattande nickelprospektering har bedrivits i Sverige de senaste 70 åren och de mer malm potentiella områdena för nickel är ganska väldefinierade liksom typen av värdbergarter. Även om inga av de kända nickelfyndigheterna i Sverige har halter/tonnage som motsvarar det som bryts i andra delar av världen kan det inte helt uteslutas att det med bättre geofysiska metoder i kombination med användandet av malmgenetiska modeller och en bättre kunskap om värdbergarternas karaktär går att hitta lönsamma fyndigheter av nickel i Sverige. En relativt betydande nickelproduktion sker i Finland och en betydande potential finns för ökad produktion i framtiden i ännu oexploaterade nickelfyndigheter.¹⁰⁸

3.4.8 Germanium och gallium

Fram till 1970-talet var germanium det primära materialet till halvledare i elektronik. Det ersattes senare mer och mer av det billigare alternativet kisel men har fortfarande en viss användning inom halvledarindustrin, ofta i kombination med kisel. I framtiden förväntas användning inom fiberoptik och solceller öka mer och mer, särskilt inom fiberoptik där inget alternativt material hittats. Mer än hälften av all germanium används till fiberoptik och infraröd optik, en fjärdedel till katalysatorer och omkring 15 procent till elektronik och solceller.

Gallium kommer till stor användning som halvledare inom modern teknik, till vissa legeringar, medicinska instrument och som tandfyllningar. Användningen av gallium förväntas öka inom de närmaste åren.

Ingen brytning av gallium och germanium har förekommit i Sverige och prospektering har heller inte förekommit. Förutsättningar och potential för

¹⁰⁶ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 106, bil. 2.

¹⁰⁷ <https://www.sgu.se/globalassets/om-sgu/nyheter/2022/metallprisbilagor/prisbilaga-februari-2022.pdf>

¹⁰⁸ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 63, bil. 1.

utvinning är mycket begränsade. Germanium kan däremot återvinnas; omkring 30 procent av all germaniumproduktion kommer från återvinning. För gallium finns en potential till återvinning inom industrin.

3.4.9 Molybden

Legeringar med molybden ökar materialens hårdhet, styrka, seghet och korrosionsbeständighet. Ren molybdenmetall används i t.ex. lampor, transistorer och likriktare. Molybden är en sällsynt metall men tillhör formellt inte de uppräknade innovationskritiska metallerna. Molybden har ändå tagits med i översynen eftersom den har stor betydelse för flera teknologier inom den gröna omställningen, t.ex. solceller, vindkraft och avskiljning och lagring av koldioxid (carbon capture and storage, CCS). Molybdenmalm bröts i Sverige under första och andra världskriget, men i dag sker ingen brytning.¹⁰⁹

Återvinningen av molybden är dock väl utvecklad och bedrivs i dag på industriell nivå. Molybden återvinns i hög grad, drygt 30 procent och det finns flera företag som återvinner. Det finns inga signifikanta tekniska luckor som väsentligt begränsar återvinningen av molybden. Återvinningsmarknaden är växande och målet är satt till uppemot 80 procent. Möjliga hinder för detta är att ekonomiska incitament för slutanvändare att återlämna eller återta molybdenhaltigt stål delvis saknas. Molybden finns i flera olika ståltyper och för en effektiv återvinning utan en tydlig nedgradering av materialet bör dessa sorteras före en eventuell återvinning. Detta låter sig dock inte göras på ett smidigt eller lönsamt sätt, varför en kontinuerlig nedgradering av de högkvalitativa produkterna sker i återvinningen.¹¹⁰

3.4.10 Slutsatser om uppskattad potential

Nedan finns i tabellform summerat de slutsatser som framkommit i forskarrapporterna om ett urval metaller och mineral. Det finns även en sammanställning i tabellform med uppskattad möjlig produktion för motsvarande metaller och mineral¹¹¹. Som även framgått av föregående redovisning är det tre metaller och mineral som har en mer betydande potential för produktion: grafit, vanadin och sällsynta jordartsmetaller.

Figur 7 Summering av det uppskattade nuvarande kunskapsläget i Sverige¹¹²

Metall/ mineral	Historisk produktion	Tidigare undersökn.	Pågående projekt	Potential
Litium	Obetydlig	Viss	Tidig fas	Begränsad
Kobolt	Liten	Viss	Tidig fas	Begränsad
Nickel	Liten	Betydande	Medel-sen fas	Viss

¹⁰⁹ Utveckling mineraltillgångar och mineralreserver 2017, pressmeddelande Boliden 18-02-14.

¹¹⁰ Vollmer Retegan och Ekberg, 2021, s. 107 f., bil. 2.

¹¹¹ Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 89, bil. 1.

¹¹² Wanhainen och Martinsson, 2021, s. 76, bil. 1.

Metall/ mineral	Historisk produktion	Tidigare undersökn.	Pågående projekt	Potential
Vanadin	Ingen	Betydande	Sen fas	Betydande
Grafit	Viss	Betydande	Sen fas	Betydande
REE	Obetydlig	Viss	Sen fas	Viss-betydande
Gallium	Ingen	Obetydlig	Inga	Ovisst
Germanium	Ingen	Obetydlig	Inga	Ovisst
Indium	Ingen	Obetydlig	Inga	Ovisst

4 Styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller och mineral

Sammanfattning: I en av forskarrapporterna redovisas olika typer av barriärer för ökad återvinning av innovationskritiska metaller samt några lärdomar för utformningen av styrmedel som kan främja återvinningen. Forskningen har identifierat hinder för ett fungerande återvinningssystem, främst bristande lönsamhet samt teknologiska och institutionella barriärer. Några framgångsfaktorer vid utformning av styrmedel lyfts fram i rapporten: produktperspektiv i utformningen av styrmedel, krav på ökad information om produkters ursprung och innehåll, kombinera styrmedel, skapa förutsättningar för cirkulära affärsmodeller, väl definierade äganderätter, olika pilot- och demonstrationsanläggningar, offentlig upphandling samt systemövergripande styrmedel.

En strategi för att säkerställa framtida tillgång till innovationskritiska metaller är att främja ökad återvinning av dessa metaller. Handlingsplanen för en cirkulär ekonomi lyfter fram återvinning av innovationskritiska metaller och mineral som en prioriterad värdekedja i omställningen till en cirkulär ekonomi. Som tidigare redovisats är dagens återvinningsgrader för innovationskritiska metaller låga och täcker inte de behov som finns. För bulkmetallerna (t.ex. koppar, stål och aluminium) har däremot en förhållandevis effektiv skrotmarknad vuxit fram över tid och återvinningsgraden är betydligt högre.

För att främja en ökad återvinning av innovationskritiska metaller och mineral kan olika styrmedel användas. Styrmedel finns av olika karaktär: reglerande, ekonomiska och informativa. Olika exempel på styrmedel med betydelse för återvinning av innovationskritiska metaller är krav på produktdesign, krav på återvinningsgrad, krav på hantering av uttjänta produkter, insamling av olika produkter, åtgärder mot illegal export, åtgärder för lagring, standarder, certifiering, informationssystem, avgifter samt offentlig upphandling.

Inom översikten har en forskare¹¹³ fått i uppdrag att – med utgångspunkt i tidigare forskning – identifiera och diskutera olika typer av barriärer för ökad återvinning av innovationskritiska metaller, samt redogöra för några lärdomar för utformningen av politiska styrmedel som kan främja återvinningen.

Av forskarrapporten framgår att forskningen inom området är relativt begränsad. Det finns få empiriska erfarenheter av styrmedel som är utformade för att främja återvinningen av specifikt innovationskritiska metaller. Empirin har därför hämtats huvudsakligen från den teoretiska forskningen om incitament för materialåtervinning under olika styrmedel och institutionella förutsättningar samt från forskning om hur existerande marknader för olika

¹¹³ Söderholm, Patrik, Barriärer och styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller, 2021, bil. 3.

bulkmetaller vuxit fram över tid. Vissa specifika styrmedel och policyförslag har kommenterats för att illustrera och exemplifiera viktiga poänger och en diskussion förs om ett antal vägval och generella lärdomar för politikens utformning. Syntesen av forskningen bygger huvudsakligen på ett samhällsekonomiskt angreppssätt. I det följande summeras några av de huvudsakliga iakttagelserna och slutsatserna i forskarrapporten.

4.1 Återvinningsprocessen komplex

Primär produktion resulterar i metaller, som förädlas till nya produkter, byggnadskonstruktioner och infrastruktur. En betydande del av det metallskrot som genereras längs värdekedjorna kommer direkt från de olika tillverkningsstegen. Dessa flöden är förhållandevis slutna med höga återvinningsgrader av skrot (som ofta är fritt från legeringar och spårelement). Återvinningsprocesserna för olika skrottyper skiljer sig åt men består typiskt sett av insamling, demontering, fragmentering, sortering och smältning.

Marknaderna för återvunna metaller, inte minst de innovationskritiska, kännetecknas av komplexitet. Dessa marknaders funktionssätt avgörs i hög grad av vilka produkter som återvinns. Detta är speciellt tydligt i demonteringsfasen där olika företag ofta specialiserar sig på utvalda produkter, t.ex. hemelektronik eller fordon. Beroende på produkternas komplexitet samt vilka metaller som återvinns kommer även behovet av sortering, demontering och fragmentering samt olika processmetallurgiska processteg att vara olika stort. Ett exempel är bilar där mer och mer elektronik har introducerats över tid. Denna trend förstärks i och med introduktionen av elbilar där kobolt och litium behövs i batterierna. Även olika sällsynta jordartsmetaller är viktiga komponenter i elbilar, t.ex. i batteriet (lantan, cerium), motorn (neodym, praseodym, dysprosium, terbium), i LCD-skärmar (yttrium, cerium, europium) och i katalysatorn (cerium, lantan). En utmaning för metallåtervinningssektorn är att tillverkningen av vissa produkter är beroende av metaller i ren form för att åstadkomma de rätta egenskaperna, t.ex. hållbarhet eller låg vikt. Detta gör det svårt att återvinna metallerna för användning i samma produktionsprocess; det är med andra ord inte säkert att all den metall som återvinns från uttjänta fordon – med dagens teknologi – kan användas i produktionen av nya fordon.

En viktig begränsning för ökad återvinning av metaller är tillgången på återvinningsbart material är betydligt lägre än nuvarande användning av metaller. Ett flertal bedömningar¹¹⁴ visar att den framtida användningen av innovationskritiska metaller kommer att öka i en hög takt framöver, inte minst som ett resultat av utbyggnaden av vindkraft och solenergi samt en ökad användning av elfordon. De absoluta volymerna av metallskrot som kan återvinnas kommer också att öka över tid, men så länge användningen av innovationskritiska metaller ökar kommer andelen sekundär produktion av total användning att förbli relativt låg och behovet av primär produktion att kvarstå.

¹¹⁴ Se bl.a. avsnitt 2.3.

4.2 Problem med lönsamheten i återvinningen

Det ekonomiska värdet av metallåtervinning är viktigt för industrins incitament att investera i sekundär produktion. Detta värde bestäms av marknadspris samt av kostnader för att samla in, demontera och förädla metallen. Ofta är det enbart de metaller som finns i stora volymer och som betingar ett högt värde per kilo som återvinns. Förutsättningarna för investeringar i metallåtervinning påverkas av osäkerheten om den framtida metallprisutvecklingen. I forskningslitteraturen är det vanligt att de kraftiga prisfluktuationerna för metallskrot pekats ut som ett viktigt hinder för sådana investeringar.

I fallet med bulkmetaller är priserna på metallskrot typiskt sett mer volatila än motsvarande priser på metaller baserade på primär produktion. För de flesta innovationskritiska metaller saknas i regel öppna marknadsplatser och detaljerad information om prisutvecklingen är inte lika tillgänglig. Transparensen på marknaderna för återvunna innovationskritiska metaller är i dag låg, bl.a. som en följd av att återvinningsnivåerna fortfarande är blygsamma. Den övergripande bilden är dock att priserna på olika innovationskritiska metaller från primär produktion har varit betydligt mer volatila än motsvarande priser för bulkmetallerna.

En viktig problematik är förekomsten av asymmetrisk information, dvs. när en aktör inför en potentiell marknadstransaktion har ett informationsövertag gentemot en annan. Köpare kan ofta inte fullt ut bedöma egenskaperna i en given materialström och säljarna har inte nödvändigtvis några tydliga incitament att delge information om olika produkters egenskaper eller osäkerhet om det erbjudna materialets innehåll, kvalitet och därmed ekonomiska värde. Kvaliteten på metallskrot har normalt en mycket högre variation än de metallflöden som är baserade på primär produktion. Den ökande komplexiteten vad gäller metallinnehållet i olika produkter – t.ex. mobiltelefoner, bilar och hemelektronik – innebär att problematiken med asymmetrisk information är reell för såväl bulkmetallerna som de innovationskritiska metallerna.

4.3 Teknologiska restriktioner

En viktig barriär för ökad metallåtervinning kan kopplas till olika teknologiska restriktioner. Ett konkret exempel är avsaknaden av en automatiserad och kommersiellt gångbar teknologi för demontering av elektroniska komponenter. Här behövs fortfarande manuell demontering. Återvinningen har dominerats av små, decentraliserade företag. Under stora delar av 1900-talet var återvinningsbranschen relativt arbetsintensiv och lågteknologisk även i industrialiserade länder som Sverige. I många länder globalt – inklusive Kina – står småskalig produktion (insamling) fortfarande för en stor del av de inhemska marknaderna.

Att återvinningen av innovationskritiska metaller, t.ex. litium från bilbatterier, fortfarande ligger på en låg nivå beror dels på bristande incitament att utnyttja de möjligheter till metallåtervinning som dagens teknologi erbjuder,

dels på avsaknaden av effektiv teknologi. Här finns dock aktuella exempel på framgångsrika teknologier (t.ex. Northvolt Revolt). Ny kunskap – t.ex. om olika metallurgiska processer – är också viktig för att möjliggöra framtida metallåtervinning från komplexa produkter och materialflöden (t.ex. gruvavfall), samt för att spåra produkter över livscykeln och koppla dem till en databas över produkternas innehåll och egenskaper. Forskning har, bl.a. baserat på kvantitativa analyser av patentdata, pekat på en något vikande innovationsaktivitet inom återvinnings- och avfallssektorn.

Forskningen har visat att styrmedel vars syfte är att öka materialåtervinningen, t.ex. producentansvar, kan stimulera utveckling av ny återvinningsteknologi (t.ex. sådan som underlättar demonteringen av uttjänta bilar). Studier har visat att den ökade återvinningen av bl.a. bly, tenn, silver och guld från elektronikskrot möjliggjorts av nya innovationer, som bl.a. EU:s direktiv om elektronikskrot stimulerat fram.

4.4 Institutionella barriärer

När det gäller de formella institutionerna har olika studier pekat på problem med den nuvarande lagstiftningen, som riskerar att utgöra barriärer för ökad metallåtervinning. För det första är det viktigt att konstatera att precis som all industriell verksamhet är även metallåtervinningssektorn beroende av väl fungerande ramvillkor i form av transparent lagstiftning om kontraktsfrågor, markanvändning, miljöpåverkan, avfallshantering etc. Sådana ramvillkor är viktiga för att denna typ av samarbeten mellan tillverkare och återvinnare ska bli av, s.k. business-to-business (B2B). En aktuell fråga i en svensk kontext är miljöbalksprövningen av industriell verksamhet, som ibland har bidragit till att öka investeringsriskerna, bl.a. i form av utdragna tillståndsprocesser och frekventa överklaganden.

Även avfallslagstiftningen, som bygger på EU:s avfallsdirektiv, kan skapa problem för metallåtervinning i vissa fall. Det finns en utmaning i hur samhället bör reglera hantering och användning av ”avfall” och när avfallet kan betraktas som en ”produkt” och därmed kan handlas på en marknad. I detta sammanhang har exempelvis EU:s s.k. end of waste-kriterier fått kritik av forskare, inte minst eftersom det ofta i praktiken endast är avfall som redan cirkuleras som får klassificeras som en produkt. Röster har därför höjts för att bredda denna binära indelning av material, och tillåta mer heterogenitet. Avfall utgör såväl en möjlighet som en risk för samhället, och kanske är det, enligt forskarrapporten, så att dagens lagstiftning fokuserar för lite på möjligheterna och relativt sett för mycket på de direkta hälso- och miljöriskerna.

Ett annat exempel handlar om den lagstiftning som reglerar handeln med avfall och skrot mellan länder. Inom EU ökar metallåtervinningen från uttjänta fordon. Ett problem är dock den ibland illegala exporten av äldre fordon till länder utanför unionen, vilket har inneburit en begränsad tillgång på använda katalysatorer för effektiv återvinning i moderna anläggningar. På denna punkt bedöms det därför finnas ett behov av att reformera lagstiftningen genom att

dels klargöra när ett fordon nått sin slutliga livslängd (end-of-life) i det EU-direktiv som reglerar hantering av uttjänta fordon (2000/53/EG), dels lägga större ansvar och bevisbörd på exportörerna. Ett annat sätt att reducera problemen med illegal hantering av uttjänta produkter är att reducera de administrativa kostnaderna för att leva upp till lagstiftningen, t.ex. de aktuella EU-direktiven. Som en följd av den s.k. avfallstransportförordningen (EG 1013/2006) är det t.ex. administrativt krångligt att transportera metallavfall mellan länder inom EU och ännu krångligare om handeln sker med icke-OECD-länder. De metaller som klassas som ”farligt avfall” inbegriper framför allt sådana som är vanligt förekommande i legeringar, t.ex. bulkmetallerna koppar och nickel samt de innovationskritiska metallerna kobolt, volfram och sällsynta jordartsmetaller. De regler som finns kring handeln med farligt avfall, inklusive de administrativa kostnader som följer av dessa, påverkar möjligheterna att utveckla en konkurrenskraftig återvinning av metaller.

4.5 Framgångsfaktorer för styrmedel

I detta avsnitt redovisas i korthet några av de slutsatser som framkommit i forskarrapporten om framgångsfaktorer för val och utformning av styrmedel för återvinning.

Produktperspektiv i utformningen av styrmedel

Som tidigare nämnts har den ökade komplexiteten i produkter försvårat återvinningen av metaller. Överlag är det därför viktigt att politiken tar explicit hänsyn till de specifika kontexter i vilka olika metaller finns tillgängliga. I praktiken handlar detta om att gå bortom ett fokus på material och i stället fokusera på värdekedjorna för de produkter som innehåller innovationskritiska metaller. Dagens situation präglas överlag av en obalans i detta avseende; fokus ligger i regel på förbättrad avfallshantering snarare än på produktdesign och återvinningsbarhet.

Förutsättningarna för återvinning skiljer sig åt. För exempelvis litiumextraktion har användning och återvinning nått en stor mognad på bara några år och drivs av behov i global skala. Den snabba utvecklingen av elektriska fordon som drivs av litiumjonbatterier har drivit på utvecklingen av återvinning redan vid tillverkningen. När det gäller denna typ av återvinning kan designforskningen kopplas till återvinningen på ett produktivt sätt.

Trenden är att många produkter kontinuerligt får bättre prestanda och nya funktioner, och detta åstadkoms genom introduktionen av mindre och mindre komponenter, fler integrerade material och nya metallegeringar. Att anamma ett produktfokus snarare än ett materialfokus innebär inte nödvändigtvis att det behövs olika typer av styrmedel för olika produktkategorier. Många länder – inklusive Sverige – har exempelvis separata producentansvar för bl.a. elektronik, batterier samt uttjänta fordon. Den viktiga poängen är snarare att först när vi förstår de incitament som möter aktörerna längs hela produktkedjan är det

möjligt att utforma lämpliga styrmedel eller styrmedelskombinationer. Ett styrmedel som passar bra för att främja materialåtervinning av t.ex. sällsynta jordartsmetaller i en kontext behöver inte nödvändigtvis vara lämpligt i en annan kontext. Och även om det finns producentansvarssystem för olika produktgrupper kan det finnas ett behov av att utforma och genomföra dessa på olika sätt eftersom förutsättningarna för en effektiv återvinning kan skilja sig åt mellan olika produkter.

En viktig del av styrningen handlar även om vilka mål som formulerats för metallåtervinningen, såväl på nationell nivå som på EU-nivå. Ett exempel på det senare är EU-direktiven om uttjänta bilar respektive elektroniskrot samt det s.k. produktdesigndirektivet. De mål som fastställts för dessa har svagheter utifrån ett metallåtervinningsperspektiv. EU:s direktiv om uttjänta fordon föreskriver 85 procents återvinningsgrad mätt som vikt. Detta skapar ett alltför trubbigt incitament att ta hand om de innovationskritiska metaller som förekommer i små mängder. På motsvarande sätt visar forskning hur viktbaserade återvinningskrav för batterier har inneburit att många företag endast återvinner batteriernas skal av stål eftersom det är den tyngsta delen.

Ökad information om produkters ursprung och innehåll längs hela värdekedjan

Ökad information om produkters ursprung och innehåll genom s.k. produktpass förbättrar förutsättningarna för reparation och återvinning. Studier har argumenterat för att en enkel märkning av bilmotorer med information om vilka typer av magneter som ingår i bilens elmotor, skulle vara ett enkelt sätt att öka förutsättningarna för återvinning av t.ex. neodym.

Regeringen anger i sin handlingsplan för en cirkulär ekonomi att Sverige ska verka för att EU inför produktpass. EU har redan tagit initiativ till att industribatterier och batterier för eldrivna fordon förses med ett unikt och individuellt pass som ska vara tillgängligt digitalt; den s.k. batteriförordningen trädde i kraft i januari 2022.

Kombinera styrmedel

Forskning visar att en kombination av styrmedel som bygger på två viktiga incitament är en framgångsfaktor. Det bör finnas dels en outputeffekt, t.ex. genom en skatt eller avgift på de produkter som genererar avfall i senare led, dels en substitutionseffekt, t.ex. genom subvention av återvinning, bl.a. i form av tillhandhållande av infrastruktur för återlämning och/eller krav på sortering av olika avfallsströmmar. Producentansvars- och pantsystem ger upphov till såväl en output- som en substitutionseffekt. Ett pantsystem innebär exempelvis att konsumenter har incitament att först hushålla med den avfallsgenererande produkten och sedan återlämna denna för återvinning på ett miljömässigt acceptabelt sätt. Forskning om styrmedel för ökad materialåtervinning visar på de svårigheter som uppstår när avfallspolitiken enbart adresserar ett av

dessa incitament. Skatter på jungfruliga råvaror gör t.ex. användningen av återvunnet material mer ekonomiskt attraktivt, men på grund av den låga pris-känsligheten för det ekonomiska utbudet av sådant material blir effekterna på återvinningen små om skatterna inte kan kombineras med åtgärder som stimulerar detta utbud, t.ex. i form av krav på sortering. I sådana fall genereras främst incitament till en outputeffekt medan substitutionseffekten blir blygsam.

Så som påpekas ovan utgör olika producentansvarssystem redan idag en viktig del av Sveriges avfallspolitik. Det bör finnas ett utrymme för att utveckla dessa system på olika sätt. Ett sätt är att bredda tillämpningen av dessa system till att omfatta nya produkter. På internationell nivå har det t.ex. funnits ett intresse av ett nytt producentansvar för vindkraftsturbiner.

Skapa förutsättningar för cirkulära affärsmodeller

Forskningen visar på flera exempel där marknadsaktörer själva har klarat av att adressera olika marknadsmisslyckanden på ett bra sätt. Vissa skrotklassificeringar och standarder, t.ex. för tester av skrotkvalitet, har initierats av branschorganisationer, vilket har reducerat informationsmisslyckandena på utbudssidan. I andra fall har vertikal integration motverkat denna problematik. Exempel på detta är B2B-samarbeten där användare av produkter innehållande metaller samverkar med återvinnare och bl.a. bibehåller äganderätten över metallen. Sådana samarbeten har skapat incitament för förbättrad produktdesign och gör det möjligt för företagen att undvika att exponera sig för kraftiga prisfluktuationer på vissa innovationskritiska metaller.

Ett svenskt exempel på detta är återvinningsföretaget Stena Recycling som samarbetar med biltillverkare. Investeringar i fragmenteringsanläggningar har gjorts i nära dialog med inte minst Volvo AB. Detta informationsutbyte har varit väsentligt inte bara för utformningen av dessa anläggningar utan även för biltillverkarnas produktionsprocesser och materialval. Samarbetet har lett till framväxten av en affärsmodell där de samverkande företagens ingenjörer har getts utrymme att tillsammans identifiera effektiva lösningar för ökad återvinningsbarhet av fordon, inklusive processinnovation.

Väl definierade äganderätter

Forskningsstudier visar att förutsättningarna för framväxten av innovativa affärsmodeller där olika företag samverkar kring metallåtervinning är speciellt gynnsamma om äganderätten är väl definierad och de transaktionskostnader som aktörerna möter är tillräckligt låga. I praktiken är detta ofta kopplat till geografisk närhet; flera studier betonar hur komplexa globala värdekedjor ökar transaktionskostnaderna för återvinning. I många situationer är det därför svårare för de inblandade parterna att internalisera de negativa externa effekterna kopplade till återvinningsbarhet. Det gäller bl.a. metallåtervinning från olika produkter som ägs eller har ägts av privata konsumenter och dessutom bytt ägare över livscykeln.

Ett exempel på affärsmodell är metallåtervinning av platina, palladium och rodium från katalysatorer. Katalysatorer används bl.a. inom processindustrin, t.ex. raffinaderier, för rening av gaser och vätskor. Tidigare sändes förbrukade katalysatorer iväg för destruktion - en förhållandevis dyr hantering. Under de senaste två decennierna har återvinningen av metaller från katalysatorer ökat betydligt och når ibland återvinningsgrader som närmar sig 90 procent. Detta kan kopplas till framväxten av en affärsmodell där användare av katalysatorer, t.ex. en kemifabrik, samverkar med ett återvinningsföretag. Detta företag utför återvinningen som en tjänst åt kemifabriken, som dock behåller äganderätten till metallen genom hela processen.

En studie från 2019 visar att av den totala användningen av platina i olje- raffinaderisektorn och den kemiska processindustrin står återvunnen platina- metall för 83 respektive 72 procent. Katalysatorer används även i fordon och det finns samarbeten mellan olika biltillverkare och återvinningsföretag som liknar det nämnda exemplet med industriella katalysatorer. Återvinningen av metaller från bilkatalysatorer är dock mer komplex och svårkontrollerad. Katalysatorerna samlas in från ett stort antal användare och flyttas till nya platser i samband med ägarbyten. Trots detta har de involverade aktörerna lyckats åstadkomma ökad återvinning av metaller från bilkatalysatorer, inte minst platinagruppens metaller, men även en handfull sällsynta jordartsmetaller. En viktig förutsättning för detta har varit dessa metallers höga ekonomiska värden. Detta gäller även guld och silver som, tillsammans med bl.a. kobolt, molybden och mangan, kan återvinnas från exempelvis fordonens smörjmedel och olika magnetiska komponenter.

Pilot- och demonstrationsanläggningar

Forskningen har framhållit att pilot- och demonstrationsanläggningar spelar en speciellt viktig roll för att främja den teknologiska utvecklingen av återvinningen av innovationskritiska metaller. De teknologiska barriärer som gäller på kort sikt kan övervinnas med hjälp av investeringar i pilot- och demonstrationsprojekt, som bidrar till att öka potentialen för metallåtervinning på lång sikt. Teknologisk utveckling har redan lett till stordriftsfördelar, nya teknologier och en konsolidering av skrotmarknaden i många länder. Ett exempel på en modern, storskalig återvinning av såväl ädelmetaller som en rad olika innovationskritiska metaller från elektroniska produkter är företaget Umicores¹¹⁵ anläggning i Belgien där det årligen kan återvinnas 30 ton guld, 37 ton av platinagruppens metaller, 1 000 ton silver och totalt 68 000 ton av andra metaller.¹¹⁶

Ett annat exempel är Northvolts utvecklingsarbete kring återvinning av litium från batterier där nu en större pilotanläggning planeras för att undersöka förutsättningarna för att skala upp den aktuella processen. Vidare har Northvolt Revolt AB och Unibap AB nyligen ingått ett samarbetsavtal för

¹¹⁵Läs mer om Umicore på <https://www.umicore.com/en/industries/>.

¹¹⁶ Metallåtervinningsens ekonomiska marknader, s. 31, Tillväxtanalys, 2021.

utveckling av automatiserad demontering av batterier för att därigenom möjliggöra en effektiv återvinning av batterier från elbilar.¹¹⁷ Det finns flera exempel på utveckling av teknologi för återvinning bl.a. med artificiell intelligens (AI) och robotar.¹¹⁸ Internationellt finns ett flertal exempel, t.ex. i Tyskland kopplat till återvinning av sällsynta jordartsmetaller från skriv- och läsplattor.

Offentlig upphandling

Forskningen har framhållit hur offentlig upphandling kan vara ett potentiellt effektivt marknadsdrivande styrmedel. Syftet med marknadsdrivande styrmedel är att skapa ett lärande i produktionen samt användning av ny återvinningsteknologi. Detta skapas bäst om den offentliga sektorn står för en stor andel av den relevanta marknaden, t.ex. specifika produkter där olika metaller ingår.

Systemövergripande styrmedel

Staten kan skapa olika former av generella funktioner i innovationssystemet, t.ex. kompletterande åtgärder som syftar till att stärka de aktörsnätverk som behövs för att stödja den nya tekniken, s.k. nätverksstyrning. Detta kan bl.a. handla om att skapa nya plattformar för aktörssamverkan samt om olika organisatoriska lösningar, inklusive hur olika företags anspråk på immateriella rättigheter ska hanteras. En framgångsrik teknologisk utveckling för ökad metallåtervinning behöver bygga på nya aktörsnätverk längs hela produktkedjan, t.ex. ett ökat samarbete mellan materialforskare och de ingenjörer som utformar motorsystemen i nya fordon. Staten kan potentiellt spela en viktig roll för att stimulera ett sådant samarbete; i Sverige skulle detta kunna ske inom ramen för de strategiska innovationsprogrammen, t.ex. Re-Source och SMI.

¹¹⁷ Pressmeddelande den 9 februari 2022, Unibap och Northvolt ingår samarbetsavtal.

¹¹⁸ Se t.ex. <https://www.amrobotics.com/electronic-scrap>.

Källförteckning

Betänkande 2020/21:NU18 *Mineralpolitik*.

Energimyndigheten (2021). *Forskningsöversikt om återvinning och återbruk av litiumjonbatterier*. Hans Eric Melin. Circular Energy Storage.

Europaparlamentet (2015). *Recovery of Rare Earths from Electronic wastes: An opportunity for High-Tech SMEs*.

Europeiska kommissionen (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials*.

Europeiska kommissionen (2020). *Critical Raw materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study*.

Europeiska kommissionen (2020). *En ny handlingsplan för den cirkulära ekonomin för ett renare och mer konkurrenskraftigt Europa*.

Europeiska kommissionen (2020). *Resiliens för råvaror av avgörande betydelse – Att staka ut vägen mot ökad trygghet och hållbarhet*.

IEA (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, World Energy Outlook Special Report.

Ljunggren Söderman, Maria och Ingemarsdotter, Emilia (2014). *Användning och återvinning av potentiellt kritiska material – Kunskapsöversikt*, Chalmers, 2014:20.

Naturskyddsföreningen (2021). *Metaller – en ändlig resurs med oändlig potential*.

Regeringen (2020). *Uppdrag att utveckla myndighetssamverkan för Sveriges delar av en hållbar europeisk värdekedja för batterier*, I2020/02025/E.

Regeringen (2021). *Uppdrag att öka möjligheterna till hållbar utvinning och återvinning av mineral och metall från sekundära resurser*, N2021/01038.

Regeringen (2021). *Prövningsprocesser och regelverk för en hållbar försörjning av innovationskritiska metaller och mineral*, dir. 2021:16.

Regeringskansliet (2013). *Sveriges mineralstrategi – För ett hållbart nyttjande av Sveriges mineraltillgångar som skapar tillväxt i hela landet*, N2013.02.

Regeringskansliet (2020). *Cirkulär ekonomi – Handlingsplan för omställning av Sverige*, den 9 juli 2020.

Regeringskansliet (2022). *Framtidens industri. En strategi om grön och digital omställning*, Näringsdepartementet, den 10 mars 2022.

SGU (2014). *Redovisning av regeringsuppdrag att utföra en kartläggning och analys av utvinnings- och återvinningspotential för svenska metall- och mineraltillgångar.*

SGU (2020). *Innovationskritiska metaller och mineral i Bergslagen, rapport 2020:02.*

SGU (2018). *Kartläggning av innovationskritiska metaller och mineral, rapport 2018:15.*

SGU (2021). *Mineralmarknaden 2020. Tema: Kobolt, rapport 2021:1.*

SGU (2021). *Hållbar utvinning och återvinning av mineral och metall från sekundära resurser, RR 2021:03.*

Technopolis (2019). *Sexårsutvärdering av det strategiska innovationsprogrammet för gruv- och metallutvinnande industri – STRIM.*

Tillväxtanalys (2021). *Metallåtervinnningens ekonomiska marknader – komplexitet, incitament och politisk styrning, rapport 2021:10.*

Tillväxtanalys (2019). *Spårbarhet och märkning av hållbara metaller och mineral – insatser för ökad transparens, trovärdighet och efterfrågan, PM 2019:01.*

Tillväxtanalys (2018). *Statens roll vid grön omställning genom aktiv industripolitik, PM 2018:10.*

Tillväxtanalys (2018). *Hur kan staten främja investeringar i utvinning av innovationskritiska metaller och mineral?, rapport 2018:02.*

Tillväxtanalys (2017). *Innovationskritiska metaller och mineral från brytning till produkt – hur kan staten stödja utvecklingen?, rapport 2017:03.*

Tillväxtanalys (2015). *Innovativ metallåtervinning för ökad resurseffektivitet, PM 2015:10.*

SOU 2021:26 *Använd det som fungerar – betänkande av utredningen om pant-system för småelektronik.*

SOU 2020:71 *Utvinning ur alunskiffer – Kunskapssammanställning om miljörisker och förslag till skärpning av regelverket.*

Svemin (2019). *Strategisk forsknings- och innovationsagenda för svensk gruv- och mineralindustri samt metallutvinnande industri.*

Vinnova (2017). *Forskning inom gruv- och mineralområdet – En studie av styrkor och samverkan, 2017:01.*

BILAGA I

Kartläggning över forskning om innovationskritiska metaller och mineral



Christina Wanhainen

Professor i malmgeologi
Avdelningen för geovetenskap
och miljöteknik på Luleå
tekniska universitet
christina.wanhainen@ltu.se

Olof Martinsson

Universitetslektor i malmgeologi
Avdelningen för geovetenskap
och miljöteknik på Luleå
tekniska universitet
olof.martinsson@ltu.se

1 Uppdrag

Uppdraget består i att sammanställa forskning vid universitet, högskolor (exkluderat Chalmers som inkommer med separat rapport), forskningsinstitut och industri gällande ett antal innovationskritiska metaller och mineral i en värdekedja som innefattar prospektering och utvinning av juvenilt material (malm), samt utvinning ur gruvornas restprodukter. Kartläggningen innehåller följande delar:

- En generell beskrivning över rådande kunskapsläge samt vilken forskning som bedrivs inom prospektering och utvinning av ett antal innovationskritiska metaller och mineral, i främst Sverige men med utblick över EU och världen.
- Exempel på pågående och nyligen avslutade forskningsprojekt, samt lovande resultat och kommande projekt inom prospektering och utvinning av innovationskritiska metaller och mineral.
- En bedömning - utifrån de forskningsrön som nu finns – vilken potential som finns för att möta behovet av innovationskritiska metaller och mineral, i Sverige och inom EU.

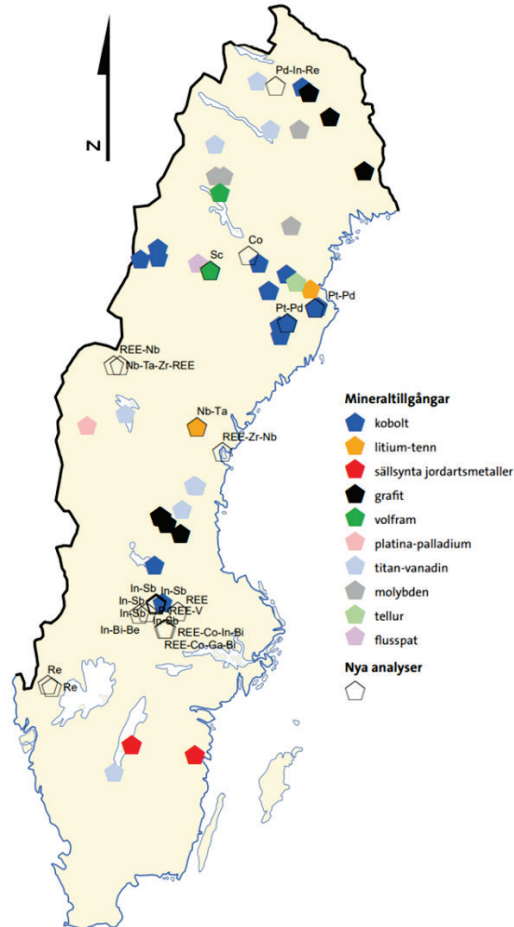
2 Introduktion

Innovationskritiska metaller och mineral (ICM) är ett urval av metaller och mineral som bedöms som kritiska för miljö- och teknikkinnovationer, innovationer som syftar till att minska miljöpåverkan genom ökad resurseffektivitet, förnybar energi och genom återvinning av råvaror. Urvalet bygger till stor del på den lista av kritiska råvaror som tagits fram och som uppdateras kontinuerligt av den Europeiska unionen (European Commission 2020). Urvalet av ICM i denna rapport bygger på den geologiska potential som finns för dessa i Sveriges berggrund, undantaget sådana metaller som det i dagsläget redan finns en produktion av i Sverige (exempelvis tellur och selen). De ICM som kommer att belysas är kobolt, litium, grafit, sällsynta jordartsmetaller, nickel, vanadin, indium, gallium och germanium, och just dessa omnämns också frekvent i de rapporter och vetenskapliga artiklar som under senare tid tagits fram gällande behovet av metaller för de fossilfria energisystemen (IEA 2021, Eilu et al. 2021, Svemin 2021, Pell et al. 2021 m.fl.). Föreliggande rapport är baserad på en stor mängd källor där endast vissa är redovisade i litteraturförteckningen. Huvuddelen av källorna utgörs av opublicerade prospekteringsrapporter från SGU, SGAB, NSG och LKAB, men även av vetenskapliga artiklar och information från företagens webbsidor.

3 Bakgrund

Det finns en mycket omfattande dokumentering och sammanställning av kända malmyndigheter i Sverige gjorda under 1900-talet (tex. Tegengren 1924, Geijer och Magnusson 1944, Magnusson 1973, Grip och Frietsch 1973)

och även för industrimineral (tex. Sundius 1952, Lundegårdh 1971). Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) gör numera uppdateringar länsvis över alla typer av mineralförekomster där hittills 12 län inventerats. En heltäckande databas (FODD) finns för hela landet för de mer betydande mineralförekomsterna vilken även omfattar Norge, Finland och de nordvästligaste delarna av Ryssland (Eilu 2012). SGU ger också ut publikationen “Mineralmarknaden” där olika metaller behandlas utförligare och på senare år har de även gjort riktade insatser med inventering av kritiska metaller i Sverige (Fig. 1, Hallberg och Reginiussen 2018, 2019, 2020; Sadeghi 2019, Claeson 2020). Ett stort antal prospekteringsrapporter från arbeten utförda under 1900-talet av SGU, Swedish Geological AB (SGAB, vilket avknoppades som ett statligt prospekteringsbolag från SGU), Nämnden för statens gruvegendomar (NSG) och LKAB finns dessutom tillgängliga i digital form vid SGU.



Figur 1. Kartan visar malmeräknade fyndigheter där något kritiskt råmaterial ingår i malmeräkningen. I kartan visas också de fyndigheter där nya analyser eller digitaliserade äldre analyser har påvisat förekomst av något kritiskt råmaterial i nedlagda gruvor, i gruvavfall eller i prospekteringsprojekt från olika tider (Hallberg och Reginiussen 2018).

Sedan början av förra seklet har ett stort antal vetenskapliga artiklar (uppskattningsvis några tusen) publicerats av forskare vid svenska universitet och av statsgeologer vid SGU. Dessa varierar från detaljerade mineralogiska arbeten på specifika fyndigheter till generella beskrivningar av enskilda fyndigheter, översiktliga studier av en speciell malmtyp och generella karaktärer av fyndigheter i ett visst malmområde. Fokus har huvudsakligen varit på de viktigare svenska malmtyperna innehållande järn, koppar, zink, bly, silver och guld, och endast undantagsvis omfattat andra typer av metallfyndigheter inkluderande flertalet av de kritiska metallerna. Undantaget är vissa av de mineralogiska arbetena som även omfattar mera ovanliga malmineral som delvis kan ha kritiska metaller som en huvudkomponent. Någon teknisk-ekonomisk aspekt av dessa metaller, eller potentialen att hitta ekonomiskt betydande fyndigheter lyfts dock sällan fram i de vetenskapliga arbetena.

Historiskt (före 1900-talet) har prospekteringen i Sverige varit inriktad på järn, koppar, bly och silver och främst utförts med enkla metoder (fynd i håll och enkla magnetiska metoder) och varit fokuserad till Bergslagen, men viss prospektering har även bedrivits i södra Sverige och sedan 1600-talet även i nordligaste Sverige (Norrbotten och fjällområdena). Från 1900-talets början har prospekteringen skett mera systematiskt där viktig teknologisk utveckling har varit markmagnetiska geofysiska mätningar och diamanborrning samt en allt ökande förståelse för malmers geologiska utbredning och karaktär genom vetenskapliga undersökningar av kända malmförekomster. Betydande tekniska framsteg skedde genom utveckling och förfining av geofysiska prospekteringsmetoder som omfattade elektriska, elektromagnetiska och gravimetriska metoder där företagen Elektrisk Malmetning AB (numera ABEM) och Boliden AB varit drivande. På senare tid har metoder för geofysiska mätningar i borrhål vidareutvecklats av Boliden AB och medfört betydande framsteg i djupprospektering efter ”blinda” malmer. Blockletning blev ett viktigt bidrag i kombination med geofysiska metoder till malmfynd i framför allt Skelleftefältet, och baserades på ökad kvartärgeologisk kunskap. Under 1950-talet utvecklades metodik för att göra geofysiska mätningar från flygplan vilket möjliggjorde mätningar över stora områden till en låg kostnad, vilket blev ett viktigt hjälpmedel i den av SGU utförda järnmalminventeringen i Malmfälten under 1960- och 1970-talen. Dessa arbeten ledde till flera nya fynd av järnmalm men även andra mineralfyndigheter. Under 1970-talet utvecklades också geokemiska prospekteringsmetoder som en följd av förbättrad och billigare analysmetodik.

Fram till 1992, när minerallagstiftningen ändrades, har prospekteringen huvudsakligen bedrivits av svenska staten i form av SGU fram till 1982 och därefter genom NSG och SGAB, samt LKAB. Bland privata företag har Boliden AB dominerat men även andra inhemska privata företag har varit aktiva under mitten av 1900-talet. Sedan ”kronandelen” togs bort 1992 har utländska prospekteringsbolag blivit viktiga aktörer i Sverige och då främst i form av juniorföretag. Det är små bolag utan eget större kapital som är beroende av extern finansiering och ofta har sin hemvist i Kanada eller Australien. Då de är

beroende av finansiering satsar de ofta på projekt där det snabbt går att visa resultat vilket innebär att det mestadels handlar om att försöka utveckla redan tidigare kända objekt. De kan även snabbt ändra fokus till metaller som visar på en starkt ökande pristrend. De inhemska gruvbolagens prospektering syftar främst till att förse befintliga anriktningsverk med råmalm och sker därför i närområdet kring deras anläggningar och med fokus på de metaller som utgör deras huvudprodukter.

4 Innovationskritiska metaller och mineral

Nedan beskrivs kunskapsläget gällande fyndigheter för utvalda ICM, samt potentialen för utvinning av dessa i Sverige och inom EU.

4.1 Litium

4.1.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Litium har historiskt främst använts inom keramik- och glasindustrin och den huvudsakliga källan har varit litiumhaltiga pegmatiter med mineralet spodumen som främsta råvara och numera med Australien som den viktigaste producenten, men med betydande fyndigheter även i Zimbabwe. De senaste 30 åren har saltsjöar blivit en allt viktigare källa till litium i form av litiumkarbonat, med Chile som den viktigaste producenten men betydande produktion sker även i Argentina och Kina. Genom den kraftigt ökade efterfrågan av litium för produktion av litiumjonbatterier till bilar har omfattande prospektering skett i världen, delvis för nya typer av litiumförekomster där geotermiska fyndigheter kan få en viktig betydelse och ske i kombination med energiproduktion. Den för Sverige troligen enda tänkbara ekonomiska typen av litiumfyndighet är litiumpegmatiter. Internationellt har dessa fyndigheter, som bryts eller är under utveckling för kommersiell produktion, mestadels en storlek på 10 till 100 miljoner ton och med en halt på 1.0 till 1.5% Li_2O med undantag av den största producenten Greenbushes som har en halt på 2.8% Li_2O .

4.1.2 Historisk produktion i Sverige

Grundämnet litium upptäcktes i mineralet petalit i en pegmatit på Utö i Stockholms skärgård 1818 och under 1900-talet har ett flertal litiumhaltiga pegmatiter påträffats i Sverige, men den enda produktionen har skett i Varuträsk utanför Skellefteå. Fyndigheten hittades 1933 av en privatperson men undersöktes åren 1936–1946 av Boliden AB med borrhning och provbrytning, och utvinning av obetydliga kvantiteter av litium i form av 837 ton spodumen och 1382 ton petalit.

4.1.3 Tidigare undersökningar i Sverige

Pegmatiter har brutits i Sverige för produktion av kvarts och fältspat (till bland annat glas och porslin) under flera hundra år och har i samband med det även

undersökts mineralogiskt av SGU eller mineraloger vid svenska universitet. Dessa studier finns redovisade i geologisk litteratur där då kända litiumförande pegmatiter även ingår.

Någon egentlig prospektering efter litium har inte skett förrän på 1980-talet efter fyndet av litiumpegmatiter i Järkvissle i Medelpad 1982. LKAB Prospektering startade då ett projekt i mellersta Norrland som finansierades av länsstyrelsen i Västernorrland och av Norrlandsfonden. Genom omfattande fältarbeten påträffades de följande åren ett flertal litiumförande pegmatiter i Ångermanland som undersöktes genom kartering, provtagning och i vissa fall provborrning. Endast Järkvissle bedömdes som ekonomiskt intressant och undersöktes närmare med totalt 17 borrhål och en provanrikning utförd av LKAB:s forskningslaboratorium i Malmberget 1983–1985. Resultaten bedömdes inte medge en ekonomisk lönsam produktion då fyndigheten var relativt liten och med en låg halt jämfört med producerande litiumfyndigheter internationellt. En utvärdering av den ekonomiska potentialen av Järkvissle och Varuträsk redovisades i en STU-rapport 1987 där slutsatsen beträffande Varuträsk var att fyndigheten omfattade 0.4 miljoner ton med litium-förande pegmatit ner till 30 meters djup men att fyndigheten var för dåligt undersökt för en säker bedömning om den kunde vara brytvärd. Kompletterande borrning utfördes 1983–1984 av SGAB på uppdrag av Boliden AB men utan att ytterligare mineralisering kunde påvisas. Den samlade erfarenheten från prospekteringen efter litium i Västernorrland i kombination med forskningsinsatser gjorde att en prospekteringsstrategi kunde utvecklas där litiumpotentiella områden storskaligt kunde ringas in och målområden begränsas ytterligare genom riktad provtagning.

Det ökade behovet av litium de senaste tio åren och det därmed stigande priset har resulterat i en förnyad prospektering efter litium i Sverige där flera aktörer har belagt kända fyndigheter med undersökningstillstånd och utfört vissa förnyade undersökningar. Det gäller främst Varuträsk där Scandinavian Resources AB gjort en förnyad utvärdering av historiska borrhåll och även gjort metallurgiska tester och ytterligare borrning. Resultaten var inte särskilt positiva då halterna av litium mestadels var låga. Ett nyfynd av litiumpegmatit gjordes i Bergby i Hälsingland av Leading Edge Materials 2016 och undersöktes med borrning 2017 och därefter med metallurgiska tester. Fyndet är för närvarande inte tillräckligt undersökt för att man ska kunna bedöma dess ekonomiska potential.

4.1.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

En rapport beställd av NSG 1989 ger en översikt av litiummarknaden och potentialen för ekonomiska litiumförekomster i Sverige. Slutsatsen i denna var att betydande kunskap om litiumpegmatiter finns i Sverige och att utifrån dåvarande kunskapsläge och litiumpriser så var ingen redan känd fyndighet av ekonomisk karaktär. Detta på grund av för liten storlek och/eller låg halt, samt problem att producera ett koncentrat av tillräckligt hög kvalitet från Järkvissle,

vilken var den då mest intressanta fyndigheten. Även om potentialen för ytterligare fynd av litiumpegmatiter bedömdes som god ansågs förutsättningarna för att hitta ekonomiska fyndigheter som små. Prisbilden för litium är nu mera gynnsam och potentiellt ekonomiska litiumfyndigheter är under utveckling i Finland i en liknande berggrund som den som finns i mellersta-södra Norrland. Det kan därför inte uteslutas att genom systematisk prospektering påträffa fyndigheter som i ett internationellt perspektiv är relativt små men som ändå kan ha en ekonomisk potential, vilket Bergby kan vara ett exempel på. Litiumpegmatiter kan även innehålla andra metaller och mineral som kan utvinnas som biprodukter och höja värdet av fyndigheten, t ex tantal, tenn och fältspat.

4.1.5 Utblick EU

En begränsad produktion av litium sker i Portugal med användning för främst keramisk industri, men de senaste tio åren har en omfattande prospektering efter litium skett inom EU med avsikt att förse batteriindustrin med råvara. Flertalet aktörer har varit inriktade på litiumpegmatiter i framför allt Portugal, Spanien, Österrike, Irland, Finland och Sverige, men även andra typer av litiumfyndigheter i Tjeckien och sydöstra Tyskland (greisen), samt i sydvästra Tyskland och sydvästra England (brines). I inget av alla dessa projekt har de ofta optimistiska prognoserna för produktionsstart kunnat uppfyllas. Keliber OY i Finland är troligen det längst gångna projektet med möjlig produktionsstart inom något år. Även Savannah Resources i Portugal kan möjligen få sitt projekt Mina Do Barroso i produktion inom en relativt nära framtid. I båda fallen är dock prisutvecklingen för litium avgörande då fyndigheterna är relativt låghaltiga. Övriga litium-projekt bedöms vara längre från produktionsstart eller vara mindre lovande. Undantaget är Vulcan Energy's projektet i Insheim i Tyskland med utvinning av litium som en biprodukt i det geotermiska kraftverket i Rehndalen, där förutsättningarna för miljövänlig och koldioxidfri produktion är lovande. En pilotanläggning beräknas börja producera litium 2022, och efter uppgradering producera 40 000 ton litiumhydroxid per år från år 2025. Liknande projekt bedrivs även av Cornish Lithium i England men har inte nått lika långt i utveckling. Om dessa projekt visar sig vara tekniskt, miljömässigt och ekonomiskt genomförbara kan de förmodligen vara ett bättre alternativ än att utvinna litium genom traditionell gruvbrytning.

4.2 Kobolt

4.2.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Även om kobolt upptäcktes av svensken Brant 1735 så har endast smärre mängder kobolt producerats i Sverige. Viktigaste produktionen av kobolt sker i det centralafrikanska koppar-koboltbältet i form av Zambesitypens kopparmalmer. Kobolt utgör där ofta en biprodukt till kopparutvinningen. I en gruva i Kongo är det den viktigaste metallen och Kongo står för ca 70% av världsproduktionen. Dessutom sker en betydande produktion av kobolt som

biprodukt till sulfidiska nickel-kopparmalmer i främst Ryssland, Australien, Kanada och i viss mån Finland, samt från silikatiska nickelförekomster i Filippinerna, Kuba, Madagaskar och Papua Nya Guinea. Övriga typer av fyndigheter bidrar bara i blygsam mängd till världens koboltproduktion men omfattar olika typer av hydrotermala bildningar (i tex Marocko). En stor potentiell källa till kobolt och flera andra metaller (nickel, koppar, PGE) utgör mangannoduler som förekommer på havsbotten i framför allt delar av Stilla Havet.

4.2.2 Historisk produktion i Sverige

Efter upptäckten av grundämnet kobolt och dess användning som blått färgpigment inom främst porslinsindustrin har en mindre mängd kobolt utvunnits i Sverige, uppskattningsvis 310 ton koboltmetall. Den första produktionen skedde i Los i Hälsingland 1783 och pågick fram till 1760-talet varvid några hundra ton blåfärg producerades. 1777 påvisades kobolt i Gladhammars koppargruvor i Småland och produktion pågick periodvis till 1892 med en total produktion av 4260 ton malm med 6% kobolt. Även i Vena i Närke påbörjades koboltbrytning på 1770-talet med periodvis produktion till 1870-talet, men med huvuddelen av produktionen under 1800-talets första hälft och en total produktion av ca 430 ton malm. Koboltmalm utvanns även som biprodukt från Tunabergs koppargruvor från slutet av 1700-talet fram till 1889 med en total produktion av 62 ton malm. Mindre mängder koboltmalm har dessutom producerats som biprodukt i koppargruvorna i Håkansboda (1836–1841), Åtvidaberg (1897–1899) och Riddarhyttan (1905) med sammanlagt 16 ton malm från dessa tre fyndigheter. Under andra världskriget undersökte Boliden AB möjligheten att utvinna kobolt från Bolidenmalmen då vissa delar hade förhöjda kobolthalter. Efter anrikningsförsök och metallurgiska studier utvanns 26 000 ton malm med 0.6% kobolt under åren 1941–1945 för förädling i Rönnskärsverken.

4.2.3 Tidigare undersökningar i Sverige

En omfattande studie av kobolthalten i sulfidmineral från Skelleftefältets malmer gjordes i mitten av 1900-talet. Analysmetoderna var dock inte så utvecklade på den tiden och resultaten är därför oprecisa och med en hög detektionsgräns. Högsta halten av kobolt i mineralet pyrit var i kopparmalm från Adak och Laver (0.2 respektive 0.3% kobolt) och högsta halten sammantaget i de undersökta sulfidmineralen (pyrit, magnetkis, kopparkis och arsenikkis) var i arsenikkis från Adak (3% kobolt). Vid analys av kobolt i zinkblände från ett stort antal malmförekomster i Sverige uppmättes den högsta halten till 0.05% kobolt. Prospektering har utförts av framför allt SGU-SGAB under senare halvan av 1900-talet men i viss mån även av LKAB på 1980-talet, då med fokus på Norrbotten men i viss omfattning även i Bergslagen.

4.2.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

Några betydande koboltfyndigheter är inte kända i Sverige. Uppgifter i pressen om att Sverige skulle kunna bli en viktig producent av kobolt har troligen sitt ursprung i en rapport från SGU med en sammanställning av kända mängder kobolt i svenska fyndigheter där uppskattningar av halt och tonnage gjorts (Hallberg och Reginiussen 2020). Huvuddelen av de 25 668 ton kobolt som sammanställningen redovisar som kända tillgångar härrör till nickelförekomsten Rönnbäcken i Västerbotten som är en låghaltig nickelfyndighet med viss förhöjd kobolthalt (0.003% kobolt). Då den kända fyndigheten uppgår till 332 miljoner ton blir mängden kobolt i den volymen betydande (9960 ton) även om halten är väldigt låg. Även om fyndigheten har en beviljad bearbetningskoncession är en brytning av fyndigheten mindre sannolik med rådande nickelpriser då nickelhalten är låg. En ytterligare nackdel är fyndighetens läge i fjällnära terräng och brytningens sannolika inverkan på den lokala rennärningen.

Större potential har kobolt-koppar-guldförekomsten Kiskamavaara i Norrbotten. Fyndigheten är relativt liten och med en ganska låg halt kobolt (0.03-0.05% kobolt) men skulle kunna vara ekonomisk om det genom ytterligare undersökning och uppbörmning kan påvisas ett större tonnage. Det nu kända koboltinnehållet uppgår endast till 2640 ton. En nackdel är även att kobolt helt är bundet till sulfidmineralet pyrit som har en kobolthalt på ca 1%. Det är därför inte möjligt att producera ett höghaltigt koboltkoncentrat för transport till smältverk, vilket fördyrar processen. Möjligheten finns dock att genom riktad prospektering hitta liknande och eventuellt större och rikare fyndigheter i Norrbotten. Vid en eventuell nickelbrytning i Sverige kan förmodligen mindre mängder kobolt utvinnas som biprodukt. Kobolt skulle möjligen även kunna utvinnas som biprodukt från pyrit i samband med brytning av sulfidiska basmetallfyndigheter. Aitik är ett sådant exempel där relativt stora mängder kobolthaltig pyrit utgör avfall från kopparproduktionen. Även där utgör dock den låga halten av kobolt i pyriten en nackdel då det omöjliggör skapandet av ett höghaltigt koncentrat för vidare koboltutvinning. Tidigare brutna koboltfyndigheter i Sverige har innehållit specifika koboltmineral vilket möjliggjort erhållandet av ett höghaltigt koncentrat. Nackdelen är att dessa koboltmineral även innehåller höga halter av arsenik. De kända fyndigheterna med koboltmineral tycks även vara relativt små, möjligen med undantag för kopparmalmsdelen i Zinkgruvan och Vena. Sammanfattningsvis är förutsättningarna inte särskilt goda utifrån nu kända förhållanden (låghaltiga och mestadels små fyndigheter) att erhålla en inhemsk koboltproduktion av någon betydelse.

4.2.5 Utblick EU

En begränsad produktion av kobolt har historiskt skett inom EU. Numera har endast Finland en viss produktion av kobolt (1560 ton kobolt/år) från flera olika typer av mineralförekomster där den producerande polymetalliska fyndigheten Talvivaara har den största kända tillgången, men även Kevitsa

producerar en del kobolt som biprodukt. Dessa två fyndigheter tillsammans med flera andra kobolthaltiga fyndigheter gör Finland till det land med störst potential för koboltproduktion. Viss potential finns även i lateritfyndigheter i Grekland (Lauri et al. 2018).

4.3 Nickel

4.3.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Nickel har huvudsakligen använts som legeringsmetall i stålindustrin men på senare tid även i batterier till elfordon. Nickel utvinns från sulfidiska Ni-Cu-(Co-PGE)-fyndigheter associerade med ultrabasiska-basiska intrusioner och från nickel-silikat-fyndigheter bildade genom lateritvittring av ultrabasiska bergarter. Drygt hälften av världsproduktionen kommer från nickel-silikat-fyndigheter där Indonesien är främsta producent följt av Filippinerna och Nya Kaledonien. Övrig produktion kommer från sulfidiska Ni-Cu-fyndigheter där Ryssland dominerar följt av Kanada och Australien men där en viss produktion även sker i Finland. De fyndigheter som finns i Sverige är av den sulfidiska typen.

4.3.2 Historisk produktion i Sverige

Grundämnet nickel upptäcktes av Cronstedt 1751 i mineral från koboltfyndigheten Los i Hälsingland men produktion av nickel har endast skett i mindre skala i Sverige och omfattar totalt 4000 ton (Nilsson 1985). Den tidigaste produktionen var från fyndigheter som tidigare brutits för koppar (Kleva i Småland 1845-1889, Slättberg 1851-1878 och Kuså 1874-1885, 1941-1942 i Dalarna). Några andra fyndigheter bröts också i mindre omfattning under 1800-talets senare del i Västmanland, Södermanland och Östergötland. Halterna i bruten malm under 1800-talet är ganska osäkra men anses ha varit 0.7-2.0% nickel. Under andra världskriget har Slättberg och Kuså i Dalarna och Lainijaur i Västerbotten också brutits.

4.3.3 Tidigare undersökningar i Sverige

Viss prospektering efter nickel skedde troligen redan under 1800-talets andra hälft men genom minskat nickelpreis under senare delen av 1800-talet så avtog intresset för metallen. Från mitten av 1900-talet har dock prospektering av nickel åter skett av flera olika aktörer. Boliden AB påträffade Lainijaur 1940 vilket blev en viktig inhemsk nickelproducent under andra världskriget. Det resulterade även i att Boliden AB startade en landsomfattande nickelprospektering 1941-1942 och även senare under 1970-talet med fokus på Norrbottens kustland vilket ledde till fynd av flera subekonomiska fyndigheter. Under 1970-talet gjordes även anrikningsförsök och metallurgiska studier av låghaltiga men stora nickelfyndigheter i fjällnära delar av Västerbotten.

Även SGU genomförde en omfattande och systematisk prospektering efter nickel under åren 1968-1982, och genom SGAB till 1984. Den omfattade

större delen av Sverige men fokus kom att bli i Västerbottens östra delar efter upptäckten av Lappvattnet sydväst om Skellefteå 1971. De följande åren gjordes ytterligare fynd av nickel och totalt togs ca 13 000 prover. Uppföljande geofysisk markmätning gjordes på 35 uppslag och diamantborrning på 20 objekt i Västerbotten. Av nio objekt med >0.4% nickel gjordes mer systematisk uppborrning och malmeräkning. Lappvattnet som var den ekonomiskt mest intressanta utvärderades närmare med gruvundersökning, provbrytning och metallurgiska tester. Den slutgiltiga bedömningen blev dock att fyndigheterna var för små och/eller för låghaltiga för lönsam drift. Även LKAB Prospektering genomförde viss prospektering efter nickel i Norrbotten på 1980-talet men med begränsade insatser och resultat.

De senaste 20 åren har flera av de kända nickelfyndigheterna i främst Västerbotten belagts med undersökningstillstånd och delvis undersökts ytterligare med borrning av flera olika aktörer men utan positivt utfall. Tidigast var Outokumpu som förutom ytterligare borrning på kända förekomster även bedrev prospektering i delvis nya områden. Därefter har Blackstone bedrivit prospektering i Västerbotten med bland annat förnyad borrning på Lainijaur och där påvisat ytterligare mineralisering på djupare nivåer. Även Västerbottens fjällrand (Rönnbäcken) har blivit föremål för ytterligare undersökningar av IGE (Nickel Mountain) som genom ytterligare borrning och geometallurgiska studier påvisat ett betydande tonnage med låghaltig nickelmineralisering. Företaget har en beviljad bearbetningskoncession från 2014 men därefter har projektet lagts på is. Viss prospektering efter nickel har även skett i Bergslagen med fokus främst på kända objekt (Kuså, Slättberg) men även med ett nyfynd av Drake Resources Ltd (Granmuren i Västmanland).

4.3.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

Relativt omfattande nickelprospektering har bedrivits i Sverige de senaste 70 åren och de mer malmpotentiella områdena för nickel är ganska väldefinierade liksom typen av värdbergarter. Däremot har prospekteringen de sista 15–20 åren varit fokuserad på redan kända objekt och någon egentlig prospektering efter nya fyndigheter baserat på etablerade malmgenetiska modeller har inte skett och djupkännande geofysiska metoder har sällan använts.

Även om inga av de kända nickelfyndigheterna i Sverige har halter/tonnage som motsvarar det som bryts i andra delar av världen kan det inte helt uteslutas att det med bättre geofysiska metoder i kombination med användandet av malmgenetiska modeller och en bättre kunskap om värdbergarternas karaktär går att hitta ekonomiska fyndigheter av nickel i Sverige. Rönnberget i Västerbotten är av delvis annan typ då den i stort sett saknar sulfidmineral, förutom det nickelbärande mineralet heazlewoodit som har en mycket hög nickelhalt och därmed kan ett höghaltigt koncentrat erhållas (25–30% nickel i koncentrat) till skillnad från de typiska sulfidiska nickelfyndigheterna (5–15% nickel i koncentrat). Fördelen är då att mängden koncentrat som ska transporteras till smältverk blir mindre i förhållande till utvunnen metall samt att

betydligt mindre svavel genereras som behöver tas omhand. Nackdelen är att malmen är låghaltig och att därför stora mängder gruvavfall skapas.

4.3.5 Utblick EU

En relativt betydande nickelproduktion (ca 60 000 ton/år) sker i främst Finland men även i Grekland. Utanför EU sker produktion i Makedonien samt i mindre omfattning i Albanien och Kosovo. Då Finland har flera ännu ej exploaterade nickelfyndigheter finns en betydande potential för ökad produktion i framtiden. Mer betydande nickelfyndigheter saknas i övriga EU-länder men det kan finnas en viss potential för ekonomiska fyndigheter på Grönland.

4.4 Vanadin

4.4.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Grundämnet vanadin upptäcktes av Sefström 1830 i malm från Smålands Taberg. Metallen används huvudsakligen i stålindustrin som legeringsmetall men har på senare tid även fått användning som batterimetall. Den huvudsakliga källan är vanadinhaltig magnetit i basiska intrusioner med Kina som dominerande producent, följt av Ryssland, men förekommer även i tex svartskifferalunskiffer. I Sverige finns kända förekomster av båda malmtyperna.

4.4.2 Historisk produktion i Sverige

Ingen vanadinproduktion har skett i Sverige men järnmalmer med vanadinhaltig magnetit har brutits i mindre omfattning i Smålands Taberg 1939–1960 och i mycket liten omfattning på Ulvön 1930–1950 för produktion av järn. Även järnmalmen i Malmfälten i Norrbotten och Grängesberg i Bergslagen innehåller förhöjda halter av vanadin men inte heller från dessa har vanadin utvunnits.

4.4.3 Tidigare undersökningar i Sverige

Någon prospektering efter vanadin har inte skett i Sverige förrän på 1980-talet då tidigare kända fyndigheter med magnetit i Hälsingland på nytt undersöktes av SGAB med avseende på vanadin, och LKAB Prospektering påträffade en ny fyndighet i Vittangiområdet. Brickafyndigheten i Hälsingland undersöktes närmare av Svenska Vanadin AB med anrikningstester där ett magnetitkoncentrat med 0.92% vanadin kunde erhållas med en magnetisk metod och ett positivt resultat. Halten vanadin motsvarade vad som erhålls i producerande fyndigheter i andra delar av världen men projektet drevs inte vidare då nödvändiga tillstånd för gruvstart inte beviljats. Några av de andra kända fyndigheterna i Hälsingland har nu belagts med undersökningstillstånd av Northern X Scandinavia AB. Den av LKAB påträffade fyndigheten Airikurkkio är endast känd genom sex borrhål men har en hög halt av vanadin (0.46-0.64% V₂O₅) och troligen en betydande omfattning. Vanadinhalten i magnetiten torde uppgå

till 1.3-1.45% V_2O_5 . Även den fyndigheten har nyligen belagts med undersökningstillstånd (Airijokki) av Northern X Scandinavia AB. Fyndigheten Vanberget påträffades av SGAB 1978 och utgörs av en magnetitförande basisk intrusion med 0.23-0.54% V_2O_5 i magnetitrika partier och en halt av 1.1-1.9% V_2O_3 i magnetiten. Den är endast undersökt med sju borrhål efter att geologisk kartering och geofysiska markmätningar utförts. Fyndigheten har nu belagts med undersökningstillstånd av Asera Mining AB. En betydande förekomst av vanadinhaltig magnetit finns även i fyndigheten Ruoutevare i Kvikkjokksfjällen och har tidigare undersökts av SGU genom borring åren 1971–1973 och med anrikningstester utförda av LKAB 1973. Ytterligare undersökningar har gjorts av Beowulf Mining 2006–2010 med förnyad resursberäkning och anrikningstester. Andra men mindre undersökta fyndigheter med vanadinhaltig magnetit i basiska intrusioner utgörs av Akkavare och Jerfojaure i Norrbotten. Därtill kommer den delvis brutna förekomsten i Smålands Taberg. Alla tre har troligen ett relativt stort tonnage.

Fyndigheter av alunskiffer har i Jämtland tidigare undersökts för sitt innehåll av främst uran. Sedan det blev förbjudet att prospektera och bryta uran i Sverige 2019 har dessa istället blivit intressanta som vanadinfyndigheter. Eurobattery Minerals AB (Orezone AB) har två undersökningstillstånd i Tåsjöområdet (Ormbäcken och Fetsjön) och EU Energy Corp och Aura Energy har liknande projekt i Oviken (Häggån med en mineralresurs på 124 miljoner ton med 0.43% V_2O_5). Förutom vanadin så innehåller dessa fyndigheter även molybden, nickel och zink som kan utvinnas som biprodukt och i Tåsjö även REE samt grafit som möjliga produkter. På Österlen i Skåne driver Scandivanadium (dotterbolag till Province Resources) liknande men mindre långt gångna projekt på alunskiffer med halter av 0.39% V_2O_5 .

Ytterligare en möjlig källa till vanadin är jämmalmer av Kirunatyp vilka förekommer i Kirunaområdet och Malmberget i Norrbotten samt Grängesberg i sydvästra Dalarna och några mindre förekomster i samma region. Magnetiten i dessa malmer har ofta förhöjda vanadinhalter (0.05-0.3% vanadin) vilket kan utgöra en nackdel för vissa smältverk men även utgöra en möjlig biprodukt.

4.4.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

Det finns ett flertal kända vanadinförekomster i Sverige av en storlek som om de visar sig vara ekonomiskt och miljömässigt brytbara skulle kunna medföra en betydande produktion av vanadin. Det finns ett flertal kända gabbroida intrusioner med vanadinhaltig magnetit vilka utgör den malmtyp som huvudsakligen bryts i andra delar av världen. De förekommer på flera platser och har delvis en betydande storlek och i vissa fall vanadinhalter som kan vara ekonomiska. Flertalet av dessa fyndigheter saknar dock tillräcklig geologisk och geometallurgisk information för att avgöra deras ekonomiska potential. Flera av dem ligger också i miljömässigt känsliga och delvis skyddade områden.

Även alunskiffrar i framför allt Jämtland och Skåne men även på andra platser i Sverige utgör en mycket stor potentiell resurs för vanadinproduktion.

Halterna av vanadin i alunskiffer är på många platser likartad med de som förekommer i de vanadinhaltiga basiska intrusionerna men vanadinet uppträder på ett annat sätt tillsammans med förhöjda halter av molybden, nickel, zink och uran. För att utvinna metallerna krävs lakning med syror (hydrometallurgi) och de miljömässiga aspekterna vid brytning av alunskiffer är inte särskilt väl kända. Dessutom utgör uraninnehållet ett möjligt problem. Men om dessa fyndigheter kan nyttjas på ett ekonomiskt, tekniskt och miljömässigt acceptabelt sätt, vilket är en stor utmaning, utgör de vanadinförekomster av världsklass och skulle kunna göra Sverige till en av de mest betydande vanadinproducenterna i världen.

Försök pågår även för att utvinna vanadin som en biprodukt från brytningen av järnmalm i Malmfälten. Det är Critical Metals som försöker kommersialisera en metod att utvinna vanadin från slagg som bildats som en restprodukt i masugnar som smälter järnmalm av Kirunatyp. Slaggen håller en betydande vanadinhalt (3–4% V_2O_5) och lakningstester har visat mycket positiva resultat.

4.4.5 Utblick EU

Ingen primär produktion av vanadin sker inom EU i dagsläget men metallen utvinns ur slagg i flera länder (Storbritannien, Belgien, Holland, Tyskland och snart troligen även i Finland). Primära fyndigheter utgörs av vanadinhaltig magnetit i basiska intrusioner med de mest lovande fyndigheterna förekommande i Finland, Sverige, Grönland och utanför EU i södra Norge. Stora fyndigheter av vanadin förekommer även i alunskiffer i Sverige och i Estland och som en möjlig biprodukt i Polens kopparfyndigheter (Lauri et al. 2018). Förutsättningarna för en ekonomisk produktion av vanadin är troligen god i Finland liksom i Sverige om marknadspriserna är tillräckligt höga.

4.5 Grafit

4.5.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Grafit har många användningsområden på grund av flera unika egenskaper, bland annat god elektrisk ledningsförmåga vilket gör att det kan användas till elektroder i batterier. Grafit av hög kvalitet har tidigare huvudsakligen producerats i Sri Lanka men produceras numera i många länder med Kina som största producent (ca 65% av världsproduktionen) men med Mocambique som en snabbt växande producent. I Sri Lanka har grafit förekommit i grovkristallin form i hydrotermala gångar medan de flesta andra fyndigheterna i världen utgörs av metamorfa kolhaltiga sedimentära bergarter där grafithalten oftast understiger 15% (men kan lokalt uppgå till 30–50%). Marknadspriset på grafit är beroende på renhet och i viss mån kornstorlek. Flaky grafit av hög renhet (75–97% grafit) betingar högst pris medan amorf grafit (kornstorlek <4 μm) med grafithalt på 60–90% är betydligt billigare och har sitt huvudsakliga ursprung i metamorft omvandlad stenkol. Syntetisk grafit kan produceras av hög kvalitet men till relativt hög kostnad.

4.5.2 Historisk produktion i Sverige

Grafit har producerats i små mängder från flera förekomster i Sverige och användes i äldre tider främst till smörjmedel. Störst produktion har skett i Bergslagen i Norberg och Skälsta men även i liten mängd i Norrland (tex. Hudiksvall och Råneå). Försöksbrytning av grafit har även gjorts i Nunasvaara i Vittangi i Norrbotten för att användas som bränsle i värmeverket i Kiruna i början av 1980-talet och ca 2000 ton producerades från Nybrännan i Masugnsbyn för att användas i metallurgiska processer vid NJA (Norrbottnens Jernverk AB) i Luleå 1955–1958. Den enda mer omfattande produktionen av grafit har skett i Kringeltjärn i Hälsingland under åren 1996–2001 då 224 000 ton grafit (flaky) utvanns av Woxna Graphite AB. Gruvan lades dock ner på grund av bristande lönsamhet men med anläggningarna bevarade för eventuell återöppning senare.

4.5.3 Tidigare undersökningar i Sverige

De tidigaste mer systematiska undersökningarna av grafitförekomster skedde på tidigt 1900-tal i Vittangi där betydande förekomster av grafit påträffats vid Nunasvaara. Undersökningarna omfattade kartering och dikesgrävning samt provtagning varvid grafitiskiffer med 20–30% grafit och en mäktighet på ca 20 meter kunde påvisas. Grafiten var dock mestadels finkornig (<0.06 mm och klassad som amorf grafit) och kunde på den tiden inte utvecklas till en kommersiell produkt. Liknande fyndigheter av grafitiskiffer har påträffats på flera andra platser i Malmfälten under 1900-talet i samband med kartläggning av berggrund (SGU) och prospektering (SGU, LKAB, Nordstjernan AB) där några av fyndigheterna har påvisats genom borrhning. I samband med prospektering efter basmetaller i Hälsingland påträffades flera grafitfyndigheter av SGAB varav fyra bedömdes vara ekonomiskt intressanta och belades med utmål. De har också undersökts närmare med borrhning, mineralogiska och metallurgiska tester åren 1983–1991. Kringeltjärn utvecklades därefter till en producerande gruva av Woxna Graphite AB (tillhörande Tricoronakoncernen) 1996. Den har en bearbetningskoncession gällande till 2041 och de närbelägna fyndigheterna Månsberg till 2024, Mattsmyran till 2025 och Gropabo också till 2025. Raitajärvi i Östra Norrbotten var känd sedan 1800-talet och undersöktes av SGU 1974–1978 och senare av SGAB på NSG's begäran 1989–1992 med dikesgrävning, borrhning samt mineralogiska och metallurgiska tester och resursberäkningar.

En mer systematisk inventering av kända grafitförekomster gjordes av SGAB på uppdrag av NSG åren 1983–1992 där det även ingick att ta fram nya objekt. Objektgenereringen baserades på att fokusera på berggrund med sedimentär berggrund av hög metamorfosgrad och där flygelektriska mätningar användes för att lokalisera möjliga objekt. Uppföljning gjordes i fält med kartering, blockletning och provtagning. Arbetena utfördes huvudsakligen i Västerbotten, Västernorrland och Hälsingland med mindre insatser i Norbergsområdet, Södermanland och Östergötland. Resultaten från den

objektsgenererande delen av uppdraget gav inga mer positiva resultat då endast objekt med låg grafithalt och ofta hög sulfidhalt påträffades. Undersökningen av de redan kända förekomsterna i främst Norrbotten och Hälsingland var delvis mer positiva och mineralogiska och metallurgiska undersökningar gjordes på ett flertal fyndigheter. Anrikningsförsök visade att koncentrat av god kvalitet kunde erhållas från vissa objekt. De sista tio åren har flera av de kända objekten i Norrbotten och Hälsingland belagts med undersökningstillstånd och försök har gjorts att återstarta gruvan i Kringeltjärn (Leading Edge – Woxna Graphite AB). I Norrbotten har Talga Resources ett flertal grafitobjekt där fokus har varit att utveckla grafitförekomsten i Nunasvaara till en kommersiell produkt. Företaget har gjort kompletterande borrhningar, malm-basberäkning, provbrytning och anrikningsförsök. Den ursprungliga tanken var att framställa grafen men efter flera tester där man inte lyckades få tillräckligt hög kvalitet på produkten blev inriktningen i stället att använda råvaran för att tillverka elektroder till litiumjonbatterier med en förläggning av produktion i Luleå.

4.5.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

Till skillnad från de kända förekomsterna av grafit i Hälsingland som är relativt små och har en medelhög halt så är grafitförekomsterna i Malmfälten i Norrbotten mycket stora och med en internationellt sett mycket hög grafithalt. Mestadels är grafiten tämligen finkornig vilket medför vissa anrikningstekniska-metallurgiska utmaningar att övervinna för att erhålla en grafitprodukt av hög kvalitet. Om detta kan uppnås finns några av världens största och rikaste grafitförekomster i Malmfälten med ett tonnage som troligen kan uppgå till 300 miljoner ton och med en halt av 20–30% grafit ner till 500 meters djup i Nunasvaara-området. Liknande fyndigheter finns på några andra platser i Malmfälten och värdet av dessa fyndigheter kan avsevärt höjas om det även är möjligt att framställa grafen av hög kvalitet.

4.5.5 Utblick EU

Ingen grafit bryts för närvarande inom EU men mindre mängder produceras i Norge (<2% av världproduktionen). Däremot är grafitfyndigheter kända i flera EU-länder med en viss tidigare produktion i Tjeckien, Österrike, Tyskland, Italien och Storbritannien. Halt och tonnagesiffror saknas i allmänhet förutom för några fyndigheter från Grönland och Österrike vilka kan ha en viss ekonomisk potential (Lauri et al. 2018). Viss prospektering pågår i Finland och möjligheten till fynd av ekonomiska förekomster kan finnas.

4.6 Sällsynta jordartsmetaller (Rare earth elements, REE)

4.6.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Sällsynta jordartsmetaller (REE) används i många olika tillämpningar men mestadels i små kvantiteter. På senare tid har dock efterfrågan ökat kraftigt då

vissa av dem har fått ökad användning i superstarka magneter i elmotorer, generatorer och flera typer av högteknologiska tillämpningar. Under senare hälften av 1900-talet var USA den viktigaste producenten men numera dominerar Kina helt världsproduktionen. De viktigaste fyndigheterna utgörs av alkalina intrusioner (USA, Kina, Australien) och av låghaltiga fyndigheter där REE är absorberat i sekundära mineral bildade genom vittring av granitiska-syenitiska bergarter i tropiskt klimat (Kina). Dessutom finns låghaltiga vaskfyndigheter vilka inte längre står för någon betydande produktion då REE-mineralet monazit även innehåller höga halter torium vilket medför att det är radioaktivt. REE förekommer även i flera andra typer av fyndigheter som potentiellt utvinningsbara biprodukter. I Sverige finns flera olika typer av fyndigheter med förhöjda halter av REE omfattande bland annat granitiska och alkalina intrusioner, hydrotermala gångar, fosforitfyndigheter, REE associerat med järnmalm i Bergslagen och i de norrbottniska malmfälten, samt i pegmatiter. Flera olika begrepp används för att ange innehållet av REE i fyndigheter. TREE syftar på det totala innehållet av alla 17 jordartsmetallerna. Med TReO avses det totala innehållet av REE räknat som oxider. LREE utgör de med lägst atomnummer (La till Sm) medan HREE utgör de med högst atomnummer (Eu till Lu).

4.6.2 Historisk produktion i Sverige

Flera av de 17 grundämnena som tillhör REE-gruppen har upptäckts i mineral från Sverige, exempelvis cerium i mineralet cerit från Riddarhyttan 1803 av Berzelius och yttrium i mineralet gadolinit från Ytterby 1794 av Gadolin. Mindre mängder REE-malm har utvunnits från Bastnäs i Riddarhyttan mellan 1860–1880 och från Östra Gyttorp utanför Nora under åren 1890–1893. Ingen av dessa fyndigheter har dock undersökts närmare i modern tid.

4.6.3 Tidigare undersökningar i Sverige

Pegmatiter med REE-haltiga mineral (NYF-typ) har varit kända i Sverige sedan lång tid (t ex Ytterby i Vaxholm, ett flertal i Dalarna och i Jokkmokksområdet) och delvis varit föremål för närmare mineralogiska studier (t ex Ytterby och Ruotevare). De mer vanliga REE-mineralen utgörs av allanit, monazit, fergusonit, gadoinit, euxenit och xenotim vilka innehåller olika proportioner av LREE och HREE. Dessa mineral innehåller vanligtvis även betydande halter av uran och/eller torium. Genomsnittshalterna av REE är dock mestadels mycket låga i denna typ av fyndigheter. LKAB har sedan 1960-talet gjort flera utvärderingar av den ekonomiska potentialen av järnmalmernas innehåll av REE där förhöjda halter varit kända sedan 1930-talet. Undersökningarna har främst varit inriktade på innehållet av REE i mineralet apatit som utgör ett av de vanligare mineralen i malmerna. Halterna uppgår vanligtvis till 0.5-1.0% TREE, dominerat av LREE. Mineralogiska studier har visat att en betydande del av malmernas REE-innehåll även uppträder i mineralen monazit och allanit. Anrikningsförsök har gjorts 1979 och på 2000-talet med

framtagning av apatitkoncentrat och där resultaten visar att en större andel HREE följer med i apatitkoncentratet jämfört med LREE. Lakförsök för utvinning av REE ur apatitkoncentrat har utförts av Kemira Oy samt vid Luleå tekniska universitet med något blandade resultat. Undersökningar av REE-halt och utbyte vid provanrikning har även gjorts för mineralet titanit från Kiiruna-vaara.

Prospekteringsinsatser riktade mot REE har gjorts av främst SGAB. En genomgång av tungmineralkoncentrat från moränprovtagningar på 1970-talet beställda av NSG och SKB har identifierat flera områden med intressanta halter av REE-mineral i flera olika delar av landet. En sammanställning av kända REE-förekomster har också gjorts av SGAB på uppdrag av NSG där ett antal nya uppslag identifierades i samband med uranprospekteringen på 1970-talet. Förhöjda halter av REE har bland annat noterats i vissa graniter och granit-associerade mineraliseringar i olika delar av landet. I Mölndalsområdet i sydvästra Sverige förekommer stora områden av granit med en ofta påtaglig förhöjning av REE, Zr, Nb, Th (U, Sn, Be) med totalhalter på 0.65-0.88% REE i enstaka prover. Ingen prospektering eller andra undersökningar har dock gjorts för att få bättre kunskap om den ekonomiska potentialen. Möjligheten till stora men relativt låghaltiga tonnager av REE-mineralisering kan dock vara goda.

Höga halter av yttrium har noterats på ett flertal platser i Västerviksområdet där omfattande uranprospektering tidigare har bedrivits av bla Boliden AB, Jonsson & Co, Stora Kopparberg och SGU. Uppföljande arbeten utfördes av SGAB 1991 på utvalda objekt med positiva resultat endast i Västerviksområdet och i Riddarhyttan.

Vid Näverån i Jämtland förekommer block med monazit och xenotim med förhöjda halter av yttrium (upp till 1.2% Y). Uppföljande borning har endast påträffat smärre sektioner med högre halter (0.37-0.51% Y i upp till meterbredda sektioner).

I Tåsjö finns ett sediment med en tjocklek på 2–3 m och med 3% P₂O₅ och 0.11% REE. Ett apatitkoncentrat innehöll 0.68% REE, men anrikningsförsök med flotation och lakning gav ett dåligt utbyte. Fyndigheten har undersökts närmare av Mawson Resources Ltd åren 2006–2010 med ytterligare borning varefter ett uppskattat tonnage uppgår till 75–150 miljoner ton med 0.03–0.07% uranoxid och 0.11–0.24% TREE.

Ett flertal block av glimmerskiffer och gnejs med höga halter REE (1.2-3.0% REE) bundet till monazit, och med förhöjda halter av torium (0.58%), zirkonium (0.2% Zr) och fosfor (1.29% P₂O₅) har påträffats vid Bureå. Blocken tros ha sitt ursprung i Burefjärden vilket omöjliggjort närmare undersökningar av mineraliseringens omfattning.

I Norrbotten uppsöktes, i samband med regionala geologiska fältarbeten, ett mineraljaktfynd från 1979 av molybden i granit vid Tåresåive i Porjusområdet. Fyndet visade sig hålla höga halter av REE (upp till ca 10%). Mineraliseringen är även påtagligt anrikad på uran och torium och REE-bärande mineral är bland annat xenotim och allanit. Ytterligare sporadiska fynd i håll och

block med höga REE-halter har gjorts i norra Sverige men då ingen uppföljning gjorts kan fyndens värde inte bedömas, men de indikerar att ännu okända mer betydande REE-fyndigheter möjligen kan förekomma.

En omfattande genomgång av kända objekt med REE har nyligen gjorts av SGU (Sadeghi 2019) och med kompletterande data från av SGU utförda provtagningar i samband med EURARE-projektet. SGU har även gjort översiktliga undersökningar i form av provtagning av sandmagasin, gråbergssupplag, och borrhärdar i flera olika projekt (Hallberg och Reginiussen 2020). Ett flertal vetenskapliga publikationer och avhandlingar har gjorts om REE-fyndigheter av Bastnäs-typ i Bergslagen de senaste 17 åren av forskare från främst Uppsala universitet och SGU med tyngdpunkt på mineralogi och bildningssätt. De geologiska-mineralogiska-genetiska aspekterna av fyndigheten i Olserum i Småland har också nyligen studerats. Sammanställningar av REE-förekomster i Norrbotten har utförts baserat på opublicerat forskningsmaterial och analysdata i prospekteringsrapporter där ett flertal olika och ej tidigare kända förekomster identifierats.

4.6.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

Norra Kärr är en relativt stor fyndighet som om den visar sig vara tekniskt-ekonomiskt-miljömässigt möjlig att exploatera kan bli en viktig producent av REE inom EU. Den har fördelen av att inte innehålla förhöjda halter av uran och torium men har en relativt låg halt av REE som dessutom uppträder som en mindre beståndsdel i mineralet eudialyt. Det innebär att ny teknik måste utvecklas för extraktion av REE och att en stor mängd koncentrat måste processas. Olserum som ligger i östra Småland är en REE-fyndighet av annan typ och har ett mindre känt tonnage men en något högre halt av REE. Fyndigheten har fördelen av att REE uppträder i specifika REE-rika mineral vilket medger att ett mycket högvärdigt koncentrat kan produceras men med nackdelen att REE-mineralen även innehåller höga halter av uran och torium.

Ett mera lovande projekt bedrivs av LKAB där planen är att tillvarata apatit från järnmalmabrytningen i Malmfälten och från den framställa fosfor och REE. Projektet har fördelen att något som tidigare varit ett avfall används för en betydande produktion av EU-kritiska ämnen och med en begränsad miljöpåverkan. Ett liknande projekt är planerat i Grängesberg där apatit i existerande deponier skall utgöra råvaran. Projektet är dock ännu bara på idéstadiet. Möjligheten kan även finnas att utvinna REE som biprodukt från andra planerade eller producerande gruvor (t ex Kankberg, Malmberget, Blötberget, Viscaria).

De sedan länge kända REE-förekomsterna i Bergslagen tycks med nuvarande geologisk kunskap ha en begränsad ekonomisk potential då de förekommer i till stor del utbrutna järnmalmförekomster. Dessa är dessutom mestadels av liten storlek även om halterna delvis kan vara höga.

De flesta andra kända REE-objekt i Sverige har nackdelen av att även innehålla höga halter uran och/eller torium. Men genom riktade

prospekteringsinsatser finns det eventuellt möjlighet att påträffa nya REE-fyndigheter med låga halter av radioaktiva ämnen och då framför allt i Malmfälten där indikationer finns på sådana förekomster.

4.6.5 Utblick EU

Historiskt har mindre mängder REE förutom i Sverige även producerats i Finland och Frankrike. För närvarande sker ingen primär produktion av REE inom EU men det finns ett stort antal kända förekomster varav de flesta är kopplade till alkalina bergarter. Förhöjda halter förekommer även i bauxit i Grekland, kaolinvittrad berggrund i Finland och i skiffrar i Frankrike. Den största fyndigheten finns på Grönland (Kvanefjeld) där det har funnits planer på att eventuellt starta brytning. Detta tycks inte längre vara aktuellt då fyndigheten även innehåller uran och det nyligen beslutats att uran inte får utvinnas på Grönland. Det finns även några andra men mindre undersökta förekomster med viss ekonomisk potential på Grönland. I Finland finns ett flertal eventuellt ekonomiska fyndigheter och en betydande REE-fyndighet finns även i Norge (Fen) men har nackdelen att den innehåller höga halter av torium och uran.

4.7 Gallium, germanium, indium

4.7.1 Typ av fyndigheter och viktiga producentländer

Gallium utvinns huvudsakligen som biprodukt från aluminiumframställning från bauxitmalm vilket är råvaran för aluminium och har en medelhalt av 57 ppm gallium. Gallium utvinns även som biprodukt vid framställning av zink från zinkblände med en genomsnittshalt i zinkkoncentrat på 100-250 ppm gallium men med relativt dåligt utbyte i processen. Indium utvinns också som biprodukt vid framställning av zink från zinkblände med ett genomsnitt i zinkkoncentrat på 107–138 ppm indium, men förhöjda halter är även kopplat till greisenförekomster med basmetaller, silver, tenn och volfram. Även germanium utvinns som biprodukt vid framställning av zink från zinkblände med halter i zinkkoncentrat varierande mellan 46 och 750 ppm germanium, men utvinns i viss mån även från aska vid förbränning av stenkolk.

Den enda fyndigheten som brutits med indium som huvudmetall är Toyohagruvan i Japan med en medelhalt av 150–250 ppm indium, och den enda fyndigheten som brutits med gallium och germanium som viktiga metaller är Apex i Utah med en genomsnittshalt av 320 ppm gallium. Beträffande zinkblände varierar halterna av gallium, germanium och indium mycket mellan olika malmfyndigheter och delvis även inom samma fyndighet.

4.7.2 Historisk produktion i Sverige

Ingen.

4.7.3 Tidigare undersökningar i Sverige

Omfattande studier av halten gallium, germanium och indium i sulfidmineral har gjorts från svenska malmförekomster i mitten av 1900-talet. Analysmetoden hade dock så hög detektionsgräns (ca 10 ppm) att inga egentliga analysresultat kunde erhållas. I en annan studie analyserades spårelement i zinkblände från ett stort antal malmfyndigheter i Sverige. Högsta halten erhöles för indium från Kristineberg (800 ppm) och från Bjurliden och Bjurfors i Skelleftefältet (250–500 ppm) och endast 10% av proverna hade >100 ppm. Högsta halten för gallium erhöles i Rävliiden (300 ppm) och Östra Högkulla (100 ppm) och endast 13% av proverna hade >100 ppm. Högsta halten för germanium erhöles i Dannemora och Östra Högkulla (100 ppm).

Gallium: SGU genomför dokumentering av kritiska metaller i framför allt Bergslagen och där har även studier av gallium, germanium och indium ingått. Geokemiska studier av järnmalm från Malmberget visar på delvis förhöjda halter av gallium (30–50 ppm) i vissa delar av malmkropparna. Även REE-fyndigheten Norra Kärr har förhöjda halter av gallium (56-111 ppm Ga). En översiktlig provtagning av olika typer av malmfyndigheter har nyligen gjorts i Bergslagen för analysering av gallium och germanium. Tämigen höga halter av gallium (upp till 922 ppm men oftast mindre än 300 ppm) påvisades i REE-haltiga järnmalmer i området Nora-Riddarhyttan-Norberg.

Indium: Förhöjda halter av indium har noterats i gresienbildningar i Dalarna där halten uppgår som högst till 98 ppm i samband med Cu-Zn-Bi mineraliseringar i Norra Hållen. Fyndigheten är liten och ingen mineralogisk studie har gjorts för att påvisa hur indium uppträder.

I en mindre sulfidmineralisering (Linboms skärpning) i sydvästra Bergslagen har indiummineral (roquesite) påträffats och delvis höga halter indium i zinkblände (1.5%). Även i det närbelägna Gåsborn har samma indiummineral påträffats och halter på upp till 2% indium i zinkblände. Båda fyndigheterna är obetydliga och saknar ekonomiskt värde. Halter på upp till 1000 ppm har i äldre arbeten rapporterats för zinkblände från Zinkgruvan men inte kunnat bekräftas med moderna analysmetoder.

Germanium: De höga halter av germanium i malm från Zinkgruvan som rapporterats av SGU 2003 har inte kunnat bekräftas i senare undersökningar. Något förhöjda halter av germanium (131 ppm) har rapporterats från Malmkärren i Norberg.

4.7.4 Ekonomisk potential för svenska förekomster

Förhöjda halter av gallium har påvisats på 1980-talet i kopparfyndigheten Dingelvik i Dalsland med halter på upp till 90 ppm och ansågs eventuellt kunna bidra till fyndighetens värde som biprodukt vid en brytning av kopparmalmen. Då kopparfyndigheten för närvarande inte anses ekonomiskt brytvärd och galliumhalten är tämligen låg jämfört med andra objekt, och det dessutom är okänt i vilket mineral som gallium uppträder, saknar den för närvarande värde även som galliumförekomst. Vissa REE-rika järmmalmer i Bergslagen har kraftigt förhöjda halter av gallium (upp till 922 ppm) och om de kan påvisas vara tillräckligt stora och med REE i ekonomiska halter skulle de kunna brytas med produktion av både REE och gallium. Malmerna innehåller ibland även andra metaller som koppar, vismut, molybden och volfram som eventuellt kan bidra till fyndigheternas ekonomiska värde. Då de tidigare har brutits som järmmalmer och dessutom varit tämligen små i storlek så är det tveksamt om det kan finnas tillräckligt stora kvarstående tonnager för ekonomisk utvinning. Möjligen har utvinning av gallium som biprodukt från järmmalmer av Kirunatyp en något större ekonomisk potential även om halterna är relativt låga (30–50 ppm) då tonnagen är stora.

Utifrån nuvarande information finns inget som tyder på att halterna av indium och germanium är så höga att de skulle kunna utvinnas som biprodukt från kända malmer i Sverige, men då kunskapsläget är mycket begränsat kan ingen säker bedömning göras.

4.7.5 Utblick EU

Den enda produktionen av gallium inom EU sker i Tyskland och är baserad på importerad bauxitmalm. Gallium finns rapporterat som förekommande i en del zinkmalmer inom EU men ingen närmare information om halter och mängder finns varför inget säkert kan säjas om deras ekonomiska potential men den är troligen begränsad. En fyndighet som kan ha en ekonomisk potential för produktion av gallium som en biprodukt är Fe-Ti-V-PGE fyndigheten Skaergaard på Grönland som bedöms innehålla 21 300 ton gallium (Lauri et al. 2018). Några närmare planer att påbörja brytning av denna fyndighet finns dock inte.

Mindre mängder germanium har producerats inom EU från importerad malm. Något förhöjda halter av germanium har rapporterats från olika typer av basmetallfyndigheter och kolförekomster i en del länder inom EU men inga egentliga resursberäkningar har gjorts (Lauri et al. 2018) och möjligheten till ekonomisk utvinning är troligen begränsad.

Den största förekomsten av indium finns förmodligen i Cu-Zn-Sn fyndigheten Neves Corvo i Portugal med ett totalt innehåll av 3480 ton indium. Huruvida indium utvinnas som biprodukt är något oklart. Pöhla är en volframtenn-flusspatfyndighet i Tyskland som planeras för brytning med indium som en möjlig biprodukt. Mindre mängder indium är även konstaterat i flera basmetallfyndigheter inom EU (Lauri et al. 2018) men saknar troligen större ekonomiskt värde.

Tabell 1. Uppskattning av nuvarande kunskapsläge i Sverige gällande utvalda ICM (baserat på texten ovan)

Metall/mineral	Historisk produktion	Tidigare undersökningar	Pågående projekt	Potential utifrån nuvarande kunskapsläge
Litium	Obetydlig	Viss	Tidig fas	Begränsad
Kobolt	Liten	Viss	Tidig fas	Begränsad
Nickel	Liten	Betydande	Medel-sen fas	Viss
Vanadin	Ingen	Betydande	Sen fas	Betydande
Grafit	Viss	Betydande	Sen fas	Betydande
REE	Obetydlig	Viss	Sen fas	Viss-betydande
Gallium	Ingen	Obetydlig	Inga	Ovisst
Germanium	Ingen	Obetydlig	Inga	Ovisst
Indium	Ingen	Obetydlig	Inga	Ovisst

5 Pågående forskning

5.1 Lärosäten

Den samlade omfattningen av forskning vid svenska universitet och högskolor inom området ICM, i en värdekedja som innefattar prospektering och utvinning av juvenilt material, utvinning ur gruvornas restprodukter, samt miljöaspekter av detta, är relativt begränsad, i synnerhet i förhållande till de behov som identifierats i och med den gröna omställningen. Ett flertal lärosäten i Sverige bedriver forskning på ICM, men det rör sig mestadels om endast 1–6 seniora forskare per lärosäte som då bedriver forskning på ett fåtal ICM inom ett visst område inom värdekedjan, undantaget Luleå tekniska universitet där ca 25 seniora forskare för närvarande bedriver forskning relaterat till ICM längst hela värdekedjan (prospektering, malmkaraktärisering, brytning, utvinning, återvinning och miljöpåverkan). Här följer några exempel:

EU-finansierad forskning om vanadin, skandium och REE-utvinning från europeiska bauxitmalmer (en malmtyp som vi inte har i Sverige) bedrivs på KTH (ex. SCALE-up med start januari 2022) och Linnéuniversitetet (<https://biorecover.eu/project/>), medan man på Lunds universitet bland annat studerar redox-sensitiva ämnen i skiffrar från Skåne och Öland, med analyser av vanadin. En malmgenetisk studie av en koppar-kobolt-fyndighet i Bergslagen har också nyligen utförts i form av en studentuppsats (<https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9008261>). På Göteborgs universitet handlar ICM-forskningen främst om spårelementanalyser och datering av mineral associerade med ICM-mineraliseringar. En gedigen studie av REE-fyndigheten Norra Kärr har precis färdigställts i form av en doktorsavhandling (<https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/69728>). Stockholms universitet leder ett forskningsprojekt i samarbete med Luleå tekniska universitet på ICM i Bergslagen, forskning som kommer att utmynna i ett flertal studentuppsatser och en doktorsavhandling. Denna forskning handlar främst om mobilitet

hos ICM och basmetaller vid omvandling av berggrunden. På Uppsala universitet berör ICM-forskningen bland annat förekomsten av indium, gallium, germanium och REE i restprodukter från tidigare gruvdrift och från aktiva gruvor av olika malmtyper, samt från granitgenererade hydrotermala mineraliseringar (ex. Sahlström et al. 2019, Jonsson och Högdahl 2019).

Vid Luleå tekniska universitet (LTU) bedrivs forskning relaterat till ICM längst hela värdekedjan, ofta i en multidisciplinär konstellation. För närvarande bedrivs *ett par* EU-finansierade forskningsprojekt inom den första delen av värdekedjan, ett om litium-prospektering, som utförs i Spanien (<https://www.itarg3t.eu/>), samt ett rörande tolkning av geofysiska data från Sarfartoq-karbonatiten i Grönland, med fokus på sällsynta jordartsmetaller (Bedini och Rasmussen 2018). Ett nytt EU-finansierat projekt (EIS - Exploration Information System) som syftar till att utveckla verktyg för litium, kobolt och REE-prospektering i Europa startar under våren 2022.

Forskning på LTU kring karaktärisering av ICM i malmer och restprodukter pågår tillsammans med gruvindustrin i alla Sveriges malmområden. Det handlar om exempelvis förekomst, fördelning och halter av ICM i malmmaterial och i slagg, hur dessa beter sig i anrikningsprocesserna, om de utgör en förorening eller framtida tänkbar biprodukt, samt *om möjlighet ges* deras roll i malmbildningsprocessen. Analysmetodik för detektion av dessa små beståndsdelar av en malm utvecklas med hjälp av den senaste tekniken inom svepelektronmikroskopi, tomografi, laserteknik och synkrotronanalys (MAX IV). Ett nyligen avslutat EU-finansierat projekt har handlat om bland annat REE i olika värdmineral och procesströmmar i LKAB:s malmer (Wanhainen et al. 2017).

Forskning om spårmetallkaraktären hos olika litiummalmer och dess relevans för renheten av slutprodukten har nyligen avslutats (LiRef, se nedan). Forskning gällande processer för anrikning, utvinning och återvinning av både litium och grafit ur råmaterial från primära källor (malm) och sekundära källor (litium-jon batterier) pågår. Dock handlar forskningen på LTU kring anrikning och utvinning mestadels om järn och basmetaller men det kan i olika processsteg finnas materialströmmar innehållande ICM som då också studeras *om möjlighet ges*.

Hur ICM förekommer och rör sig vid vittring av gruvavfall, och hur de påverkar omkringliggande vattendrag, men också hur de förekommer naturligt i vattendrag, är något som studeras på LTU. Forskningen handlar då om att förstå hur dessa metaller rör sig naturligt i miljön för att öka kunskapen om deras beteende vid eventuell gruvbrytning.

Följande två forskningsprojekt (som nyligen avslutats) är exempel på multidisciplinär forskning som bedrivits på LTU av forskargrupper från olika ämnesområden längst värdekedjan, och som har utmynnat i ny och viktig kunskap gällande förekomst, mobilitet och möjlighet till utvinning av specifika ICM. Projekten har resulterat i vetenskapliga publikationer, studentuppsatser och doktorsavhandlingar, exempelvis avhandlingarna:

<http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1507935/FULLTEXT01.pdf>

<http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1507097/FULLTEXT01.pdf>

REMinE – Improve resource efficiency and minimize environmental footprint

<https://www.ltu.se/proj/Improve-Resource-Efficiency-and-Minimize-Environmental-Footprint-REMinE>):

Syftet var att studera förekomst och mobilitet av bland annat beryllium, vismut och volfram i gruvavfall, grundvatten och ytvatten i Yxsjöberg. Anrikningssanden som studerats kommer från brytning av Skandinavians största volfram-malm och avfallet har legat deponerat på gruvområdet i 50-100 år. Syftet var att studera hur dessa metaller förekommer och har påverkats av deponeringen, samt om de har lakat ut från området. Resultaten gav en förbättrad förståelse för metallernas mobilitet, transport och fastläggning i naturen, samt dess påverkan på ekosystem, vilket fram till nu varit föga känt. Dessa ämnen förespås öka i samhället i samband med ökad återvinning av högteknologiska produkter. Resultaten har även tagits i beaktande gällande frågan om det är miljömässigt fördelaktigt att använda "re-mining" som saneringsmetod i Yxsjöberg, dvs utvinna ICM ur de gamla restprodukterna för att förhindra ytterligare mobilitet. Anrikningsförsök utfördes för att studera möjligheterna till exempelvis utvinning av volfram.

LiRef - Multi-feed lithium technology

(<https://eitrawmaterials.eu/project/liref/>):

Syftet var att validera den tekniska, ekonomiska, juridiska och sociala bärigheten hos en ny elektrokemisk process för direkt omvandling av spodumenkoncentrat till hög-ren litiumhydroxid. Spodumen och spodumenkoncentrat från ett flertal europeiska fyndigheter och producenter studerades, med tanken att på sikt främja utvecklingen av *en hållbar europeisk värdekedja*. Föroreningar i spodumen från olika litium-malmer studerades med den senaste tekniken inom mikroanalys och kopplades till renheten av slutprodukten.

5.2 Företag

Det pågår en hel del forskning gällande ICM internt på olika företag. Detta är exempel på några av de större projekten som pågår för tillfället:

- LKAB har i flera perioder sedan 1960-talet gjort studier och utvärderingar av möjligheten av utvinning av REE ur apatit från sina järmmalmer. Studierna har visat på att betydande mängder av framför allt LREE skulle kunna utvinnas från apatit som en biprodukt, men de har även visat på bristande lönsamhet varför någon produktion aldrig blivit av. Efter den kraftiga (men tillfälliga) prisuppgången 2010 så har det åter blivit aktuellt att undersöka möjligheten till kommersiell utvinning av REE och ett samarbete med

Rangsells visade på en teknisk och ekonomisk möjlighet att utvinna en säljbar fosforprodukt och REE från apatit som deponerats i sandmagasin vid Kirunagruvan. Projektet drivs nu av LKAB med delvis annat upplägg, där apatiten tillvaratas redan vid anrikningen av järnmalm i pågående järnmalsproduktion. Avsikten är att bygga en anläggning för att utvinna en högren fosforprodukt och REE (<https://ree-map.com/>). Anläggningen skulle då täcka en betydande del av EU:s REE-behov (ca 30%). Grängesberg Exploration AB har liknande planer för utvinning av apatit från sandmagasinen från tidigare järnmalsbrytning i Grängesberg.

Vidare planerar LKAB och Boliden AB inom ramen för industrisatsningen ReeMAP att anlägga en industripark i Luleå för att utvinna pyritkoncentrat från Aitikgruvan i Gällivare som senare ska förädlas till fossilfri svavelsyra. Svavelsyran ska användas i LKAB:s processer för utvinning av REE och fosfor. Svavelsyraproduktionen kommer i sin tur att generera överskottsvärme som kan användas i industriparken. Från restprodukter innehållande pyrit och apatit från de båda företagens verksamheter i Gällivare och Kiruna kommer således svavelsyra och fosfor, sällsynta jordartsmetaller och gips att produceras.

- Utöver detta har Boliden AB bland annat utfört geometallurgiska studier avseende möjligheten att utvinna REE-mineral (monazit) som biprodukt ur anrikningsavfall från Kankbergsgruvan (<http://www.enviree.eu/home/>) i Skelleftefältet. Mängderna av monazit är dock tämligen små och en eventuell utvinning förväntas inte ge något påtagligt bidrag till REE-produktionen inom EU men är självklart positiv ur ett hållbarhetsperspektiv. Boliden AB har sedan 2007 systematiskt undersökt sina malmer på tänkbara framtida biprodukter. Förutom REE i ett par malmer har de i samverkan med LTU även studerat bl.a. kobolt, wolfram, molybden, antimon och rhenium (ex. Wanhainen et al. 2014, Minz et al. 2015, Warlo et al. 2021).
- Talga Resources genomför provbrytning av grafitfyndigheten i Nunasvaara, samt metallurgiska försök med avsikt att med förnyelsebar energi producera anoder till batterier. Förädlingen planeras att ske i Luleå med start 2024. Det är i första hand anoder till Li-jonbatterier (Talnode®-C) för elbilar men även andra typer av anoder för stationära batterier (Talnode®-E). Det sker också försök att utveckla en kommersiell grafenprodukt (Talphene®). Talga har även koboltprojekt i Norrbotten där (<https://www.talga.se/verksamhet/>) metallurgiska studier gett positiva resultat.
- Leading Edge Materials med sitt pågående projekt i Norra Kärr har utfört anrikningstester och metallurgiska tester för utvinning av REE. Ingen bearbetningskoncession är ännu ansökt och projektet har mött starkt motstånd från bl.a. lokal opinion. Fyndigheten är relativt låghaltig och värddmineralet har inte tidigare utgjort råvara för REE i andra delar av världen och kräver syralakning i utvinningsprocessen. Anrikningsförsök har gett

koncentrat med 5–6.5% TREO vid ett utbyte på 86% som vid lakterester med syra har gett utbyten på 91% för REE samt även utvinning av zirkonium, hafnium och niob. Renframställningen av REE och övriga metaller är planerat att göras i en anläggning förlagd till Luleå. Även nefelin kan utgöra en biprodukt som höjer värdet på fyndigheten. Fördelen med fyndigheten är att andelen HREE är relativt hög och att den inte innehåller förhöjda halter av uran och torium, eller sulfider. Gruvavfallet (gråberg och anrikningssand) vid en brytning skulle därmed inte innebära en större miljörisk än ett stenbrott för ballastproduktion. Dotterbolaget Woxna Graphite har planer på att återöppna Kringelgruvan och har genomfört metallurgiska tester. Avsikten är att uppgradera befintligt anrikningsverk och producera ett koncentrat av grafit som därefter förädlas vidare i en anläggning i Edsbyn för att producera kolbelagt grafitgranulat med en kolhalt på 99.95% för användning i litiumjonbatterier. I processen kommer även en ultrafinkorning grafitprodukt att skapas vilken kan användas i olika industriella tillämpningar (<https://leadingedgematerials.com/projects/>).

- Hos Northvolt finns en önskan om att kunna korta transporterna för råvaror till batteritillverkningen i Skellefteå genom att använda lokala, miljöcertifierade metaller i batterierna, i så stor utsträckning som möjligt. De deltar därför i flertal forskningsansökningar och projekt tillsammans med universitet och gruvföretag. Inom projektet Revolt har man nu lyckats ta fram en ny battericell från återvunna batterier. Målet är att *hälften* av alla battericeller (<https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>) år 2030 ska komma från återvunnet material.
- Critical Metals planerar att använda biprodukter från SSAB:s stålproduktion för att utvinna högre vanadin för användning i energilagringssystem och speciallegeringar (<https://criticalmetals.eu/svenska/vanadium-recovery.php>). Återvinningsprocessen ska drivas av förnybar energi. Slagg från SSABs stålverk i Oxelösund och Luleå i Sverige och Brahestad i Finland ska utgöra råvara, och uppstart planeras till senast den 31 december 2024. Critical Metals planerar också att etablera en kommersiell återvinningsanläggning för litiumjonbatterier (LiB) någonstans i Norden. Bolaget har beviljats en licens att använda LiB återvinningsteknik som utvecklas av Neometals.
- Elektrifieringen av svensk gruvindustri leder till möjligheten att ta fram metaller (basmetaller och ICM) fossilfritt och med lågt CO₂-avtryck, vilket med en miljöcertifiering kommer att gagna tillverkare av de gröna energisystem som kräver ICM (bilbatterier, solpaneler, vindturbiner, energilagring) samt givetvis klimatet i stort. Ett stort forskningsfokus hos gruvföretagen har därför på senare tid varit just elektrifiering (ex. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/energimyndigheten-ger-stod-till-bolidens-satsning-pa-elektrifierad-gruva/>) och spårbarhet/certifiering (ex. <https://www.ivl.se/projektwebbar/tracemet.html>). Om

dessas satsningar, tillsammans med en ökad användning av restprodukter, blir lyckosam, så kommer gruvindustrin i andra länder att skyndsamt måsta ställa om sin verksamhet på liknande sätt, och därmed ökar takten på den gröna omställningen globalt.

5.3 Forskningsinstitut

Både RISE och Swerim bedriver viss forskning rörande ICM. Till största delen handlar forskningen om utvinning och återvinning av ICM från avfall, samt om livscykelanalys och spårbarhet (<https://www.ri.se/sv/vad-vigor/expertiser/innovationskritiska-metaller-och-mineral>, <https://www.swerim.se/cases/utvinn-vanadin-ur-stalslagg>). Inget av instituten har kompetens i första delen av värdekedjan (prospektering) och således bedrivs förmodligen ingen forskning om nya, ICM-specifika prospekteringsmetoder och malm-bildande processer.

5.4 Sveriges geologiska undersökning

Sveriges geologiska undersökning (SGU) har enligt förordning i uppgift att tillhandahålla geologisk information för samhällets behov på kort och lång sikt. Myndigheten ska i detta syfte bedriva en behovsstyrd *insamling av grundläggande geologisk information*, och förvalta och utveckla insamlad information i syfte att göra den tillgänglig och lätt att använda. Myndighetens underlag ska kunna användas som bas för forskning och identifikation av forskningsbehov, och således är SGU:s ambition att insamlad grundläggande geologisk information ska vara av hög kvalitet. SGU har inga heltidsforskartjänster, men adjungerade professorer på deltid. SGU har under de senaste 5 åren haft (och har) tre regeringsuppdrag som har handlat om metaller som behövs för grön omställning och innovation.

Vidare så ska SGU främja och stödja riktad grundforskning och tillämpad forskning inom det geovetenskapliga området samt medverka i internationellt samarbete och internationella utvecklingsprojekt. SGU har även ett bidrag att dela ut till riktad grundforskning och tillämpad forskning inom geovetenskap om ca 6 mkr årligen. Dessa medel ska alltså täcka forskning inom berg, jord och grundvatten (på land och i hav), samt mineralhantering. Hit hör områden som samhällsplanering, grundvattenkvalitet, infrastruktur, samt naturresurser såsom exempelvis ICM.

5.5 Forskning på EU-nivå

En stor del av det som publicerats sedan kritiska metaller hamnade högt på EU:s dagordning (ca tio år sedan) är sammanställningar och kartläggningar över redan kända ICM-mineraliseringar med historiska data (ex. <https://www.bgs.ac.uk/news/cobalt-resources-in-europe-and-the-potential-for-new-discoveries/>, <https://www.frame.lneg.pt/>).

Majoriteten av den forskning som EU via forskningsprogrammet Horizon 2020 finansierat sedan 2014 gällande ICM kretsar kring återvinning, framför allt av magneter och batterier med fokus på REE, men även av annat avfall, gruvornas restprodukter, samt substitution. För att undersöka möjligheten till alternativa källor till ICM har man också finansierat ett antal forskningsprojekt inriktade på djuphavsgruvar (s.k. "deep sea mining") och asteroidgruvar (s.k. "asteroid mining") av ICM.

EIP RM (European Innovation Partnership on Raw Materials, https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/eip_en) har en SIP (Strategic Implementation Plan) som styr agendan för gruvforskningen på EU-nivå, på samma sätt som det nationella, strategiska innovationsprogrammet för gruv- och metallproducerande industri, SIP SMI (tidigare SIP STRIM, <https://www.swedishmininginnovation.se/>), gör i Sverige. LTU finns representerade i EIP RM:s HLSG (high level steering group), samt i deras expertgrupp, och LTU är också värd för innovationsprogrammet SMI.

ERA-MIN bildades 2011 och har 22 medlemsländer (<https://www.era-min.eu/>). Det syftar till att stödja EIP RM med att utveckla råvarusektorn i Europa genom finansiering av transnationella forsknings- och innovationsaktiviteter. Den senaste satsningen (ERAMIN 3) syftar specifikt till att öka synergier och koordinering mellan regional, nationell och europeisk forskningsfinansiering i råmaterialektorn.

Horizon 2020 har nu ersatts av Horizon Europe (2021-2027) med större fokus på att visa effekten av finansierade forsknings- och innovationsinitiativ. Stor vikt läggs på direkt marknads- och samhällsnytta och det är viktigt att lyckas bygga kapacitet för att ta resultatet vidare efter att projektet avslutats. Under Horizon Europe finns (precis som tidigare) plattformen ETP SMR (European Technology Platform for Sustainable Mineral Resources, <https://www.etpsmr.org/>), med fokus att stötta innovation och företagande längst hela råmaterialvärdekedjan. Under Horizon Europe finns också fortsatt EIT RM, ett initiativ inom ramen för European Institute of Innovation and Technology (<https://eitrawmaterials.eu/>). Plattformen omfattar drygt 120 parter från 22 europeiska länder, har ett av sina sex kontor (co-location centers) i Sverige (Luleå) och lanserade i september 2020 initiativet ERMA - the European Raw Materials Alliance (<https://erma.eu/>), som ett led i EUs strategi att skapa industriallianser. För närvarande drivs tre olika kluster inom ERMA, med fokus på batterivärdekedjan, magnetvärdekedjan samt högre utbildning.

De flesta universitet i Europa med forskning inom gruvvärdekedjan har ett antal forskningsprojekt som inkluderar ICM. *Exempel* på universitet och forskningsmiljöer i Europa med hög vetenskaplig produktion inom området är Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology (HIF, <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=2937>) och University of Exeter med Camborne School of Mines (<http://emps.exeter.ac.uk/csm/research/critical-metals/>, Pell et al. 2021). De senare startade 2011 en ICM allians med Storbritanniens geologiska undersökning för att stärka landets forskning inom

området. Av europeiska lärosäten är det endast LTU som besitter forskningskompetens inom *hela värdekedjan* för ICM.

Sammantaget kan man säga att det finns ett antal plattformar, initiativ och forskningsprogram vars gemensamma syfte är att bland annat arbeta för att säkra Europas tillgångar på hållbara mineralråvaror. Inga av dessa EU-satsningar är dedikerade till ICM-forskning på låga TRL, för att bygga upp ny kunskap som leder till framtida viktiga innovationer. Det finns istället ett tydligt fokus på att stödja innovationer och företagande (SMEs), samt forskning på högre TRL (vilket *bygger på* befintlig grundläggande kunskap) och fokus ligger också på de senare stegen i värdekedjan.

6 Bedömning av potentialen för ett urval ICM i Sverige

En bedömning av potential för utvinning av ICM i Sverige måste baseras på fakta om såväl kända fyndigheter som möjligheten till nyfynd. Kunskapen om kända fyndigheter utgår från tidigare undersökningar och bedömningen av ekonomisk potential är baserad på uppgifter om halter och tonnage där dessa sätts i relation till vad som internationellt anses brytvärt men även med hänsyn till befintlig infrastruktur i form av främst anrikningsverk. En ny gruva måste ge en lönsamhet som inte bara täcker löpande produktionskostnader utan även nödvändiga investeringar i infrastruktur, dvs själva gruvetableringen men även anrikningsverk om lämpliga sådana inte finns i närområdet. Om även anrikningsverk behöver byggas rör det sig om investeringar i storleksordningen på minst 5-10 miljarder SEK för en normalstor gruva och en planerad livslängd på minst 10-15 år. Detta medför att mindre förekomster sällan kan uppnå tillräcklig lönsamhet om inte ett flertal liknande fyndigheter kan utnyttja ett gemensamt anrikningsverk, eller att ett för ändamålet lämpligt anrikningsverk redan finns i området. Potentialen för nyfynd genom riktad prospektering är en uppskattning som baseras på dels omfattningen och karaktären av redan kända förekomster och i vilken omfattning prospektering redan har skett samt de geologiska förutsättningarna rent allmänt för en specifik typ av mineralresurs.

Tidsperspektivet för att påbörja produktion är även avhängigt vilket stadiet ett projekt befinner sig i. I Sverige finns flera projekt där mineralresurser är bekräftade och i vissa fall även bearbetningskoncessioner är beviljade. Dessa projekt kan vid beviljandet av nödvändiga miljötillstånd ganska snabbt gå i produktion (3-5 år) om lönsamhetsstudierna ger ett positivt utfall. Projekt som ligger i en tidigare fas och saknar bearbetningskoncession har längre startsträcka (5-10 år) till produktion och för nya fyndigheter som eventuellt kan bli resultatet av prospektering kan en eventuell produktion ligga minst 10-20 år framåt i tiden. Långa handläggningstider kan därtill bidra till att försena projekt eller försvåra deras finansiering.

Då de flesta pågående projekt på ICM i Sverige bedrivs av juniorföretag så utgör även finansieringen av verksamheten en viktig aspekt då externa

finansiärer krävs. Det gör att starka utländska aktörer kan gå in som delägare eller köpa upp lovande projekt och därmed får kontrollen över en eventuell produktion. Beroendet av finansiärer kan även ha negativ påverkan på projektets utveckling då nödvändiga kapitaltillskott kan vara svåra att få vid stagnerade eller fallande metallpriser eller ekonomiskt sämre tider i världsekonomin.

Kobolt: En småskalig produktion av kobolt har tidigare skett i Sverige men mer betydande koboltfyndigheter är inte kända och endast begränsade prospekteringsinsatser och forskning inriktat på kobolt har hittills gjorts. Endast ett fåtal fyndigheter där kobolt utgör en av huvudmetallerna är kända med Kiskamavaara som främsta exemplet men som saknar tillräckligt tonnage för att vara ekonomisk. Fyndigheten är belagd med undersökningstillstånd av Talga Resources men projektet är för närvarande inte prioriterat då fokus ligger på att utveckla deras grafitfyndighet i Nunasvaara. Det finns även ett flertal nickelfyndigheter där kobolt kan utgöra en biprodukt där den största förekomsten utgörs av Rönnbäcken, men det finns även flera mindre fyndigheter i främst nordöstra Västerbotten (se avsnittet om nickel). Möjlighet till utvinning av kobolt ur pyrit som biprodukt i vissa basmetallgruvor kan eventuellt även finnas med Aitik som troligen det bästa exemplet. Möjligheten att genom riktad prospektering påträffa ekonomiska koboltfyndigheter bedöms som relativt liten men med viss möjlighet i Malmfälten och eventuellt i Bergslagen. Det senaste årets prisökning på kobolt kan vara tillfällig men vid ett långsiktigt högre pris kan intresset för prospektering också öka. För närvarande finns inga koboltfyndigheter med beviljad bearbetningskoncession eller i form av mera mogna projekt. För Kiskamavaara finns en uppskattad mineralresurs och vissa preliminära metallurgiska studier har gjorts men ingen teknisk-ekonomisk utvärdering av projektet har genomförts.

För att bättre kunna bedöma möjligheten till utvinning av kobolt från svenska fyndigheter behövs en generell kunskap om variation i kobolthalt i olika typer av sulfidmalmer liksom variationer inom enskilda malmkroppar. Riktade forskningsinsatser för att öka denna kunskap kan vara motiverad. Det gäller särskilt de fall där kobolt kan utgöra en biprodukt i form av kobolthaltig pyrit. Systematisk analys av kobolthalt samt vilka eventuellt andra metaller som kan bidra till ekonomiskt värde (tex. guld och selen) eller vara eventuella miljöproblem (tex. arsenik) behöver då göras. Även om kobolthaltig pyrit utgjort råvara för koboltframställning internationellt i vissa fyndigheter kan även forskning för att förbättra de metallurgiska processerna vara motiverad.

Sällsynta jordartsmetaller - REE: Flera av de sällsynta jordartsmetallerna är upptäckta av svenska kemister och flera olika typer av REE-fyndigheter är kända och små mängder av metallerna har utvunnits i Bergslagen. En betydande prospektering efter REE har skett i främst statlig regi under 1980-1990-talen. Det resulterade i en stor mängd uppslag varav endast några få blev föremål för närmare undersökning. Ett av dessa är Olserum i Småland som

undersökts av Tasman Metals som även gjorde en mineralresursberäkning som visar på ekonomiska halter av REE och ett betydande tonnage. Fyndigheten är nu belagd med undersökningstillstånd av European Mineral Exploration AB. Tasman Metals fokuserade i stället på fyndigheten Norra Kärr i nordvästra Småland som är större men har en något lägre halt av REE. Till skillnad från Olserum har Norra Kärr inga förhöjda halter av uran och thorium och förutom REE är tanken även att utvinna industrimineralet nefelin som volymmässigt utgör en dominerande del av fyndigheten. Det innebär att relativt lite avfall produceras och koncentratet av det REE-bärande mineralet eudialyte planeras att transporteras till Luleå för lakning och renframställning av REE vilket tillsammans kommer att medföra en begränsad miljöbelastning i gruvområdet. En preliminär teknisk-ekonomisk utvärdering av projektet har gjorts men det har inte beviljats bearbetningskoncession. Även LKAB planerar att utvinna REE i en anläggning i Luleå. Världmineralet för REE är där apatit från gruvorna i Kiruna och Malmberget och i processen kommer även en högren fosforråvara att utvinnas. Prisbildningen för REE har efter den kraftiga uppgången 2011-2012 legat relativt stabil tills nyligen då särskilt neodym och praseodym (vilka båda används i superstarka magneter) visat en stark ökning vilket kan vara början på en långsiktigt högre prisnivå. Det kan leda till ett ökat intresse för prospektering av REE och möjlighet till nyfynd i flera delar av landet genom uppföljning av gamla uppslag från tidigare prospektering, men även påträffa helt nya objekt och då kanske främst i Malmfälten.

Då flera olika typer av REE fyndigheter med ekonomisk potential kan förekomma i Sverige behövs en bättre kunskap om vilka REE-mineral de innehåller, vilka anrikningsegenskaper de har samt vilka miljöproblem en eventuell utvinning kan innebära. Alkalina intrusioner (förutom Norra Kärr) behöver dokumenteras bättre (Alnön, Särna, Almunge) för att bedöma om intressanta halter av REE kan förekomma. De REE-anrikade graniterna i Mölndal bör undersökas närmare för att eventuellt hitta rikare mineralisering utan associerade höga halter av uran och torium. REE-förekomsterna i Bergslagen av Bastnäs-typ är geologiskt väl dokumenterade men ingen bedömning om ekonomisk potential har ännu gjorts och är därför viktig att utföra. Indikationer tyder på att förekomster av icke radioaktiva REE-mineraliseringar av hydrotermalt ursprung kan förekomma i Malmfälten och bör studeras närmare vad beträffar förekomst, karaktär och eventuell ekonomisk potential. Ytterligare metallurgiska och ekonomiska studier behöver också göras för att avgöra möjligheten till produktion av REE som biprodukt i existerande och framtida gruvor (tex. Kankberg, Viscaria, Malmberget, Grängesberg och Blötberget).

Vanadin: Ingen utvinning av vanadin har tidigare skett i Sverige men då metallen uppträder tillsammans med andra metaller (järn och titan eller uran) finns en betydande kunskap om möjliga vanadinförekomster. En viss riktad prospektering efter vanadin har även skett de senaste 40 åren. Det innebär att ett flertal betydande vanadinförekomster är kända i Sverige och de utgörs av två mycket olika malmtyper varav vanadinhaltig magnetit i gabbroida

bergarter är mest vanlig (Fe-Ti-V) men där de största förekomsterna utgörs av alunskiffer (V-Mo-Ni-Zn-U). Den förra sorten är en viktigt malmtyp för vanadin internationellt till skillnad från alunskiffer.

En fyndighet av gabbrotypen har en beviljad bearbetningskoncession (Brickagruvan som ägs av Svenska Vanadin AB) men projektet har inte drivits aktivt på flera år. En viss prospektering bedrivs av flera aktörer på andra liknande objekt. Dessa har dock troligen en relativt liten storlek men med ekonomiskt intressanta vanadinhalter. Flera projekt har inriktats på vanadinförande alunskiffer där de mest mogna projekten finns i Oviken i Jämtland och är tidigare uranobjekt. Båda projekten har uppskattade mineralresurser och preliminära tekniska-ekonomiska utvärderingar är gjorda. Men det har skett flera förändringar i ägarbildan sedan förbud mot uranbrytning infördes 2018 och projektens framtid är osäker. Projektens läge är också mycket känsligt med omedelbar närhet till orten Oviken och till Storsjön. Projektet Häggån ägs numera av Vanadis Battery Metals AB och Viken av EU Energy Corp. Liknande projekt, men i en tidigare fas av utveckling, finns i norra Jämtland (Fetsjön och Ormbäcken ägt av Eurobattery Minerals) och på Österlen i Skåne (Hörby ägt av Province Resources). Gemensamt för dessa projekt är att halterna av vanadin är betydande och med molybden, nickel och zink som möjliga biprodukter men att de även innehåller förhöjda halter av uran. Inga större förändringar av vanadinpris är att förvänta men ytterligare prospektering på kända vanadinhaltiga uppslag av både gabbrotyp och alunskiffer kan komma att ske och tillföra ytterligare fyndigheter med ekonomisk potential. Gabbrotypen är relativt lätt att påvisa med magnetiska metoder och utbredningen av berggrund med alunskiffer är väl känd vilket underlättar val av målområden. En betydande produktion av vanadin kan eventuellt ske genom utvinning från masugnsslagg, vilket då sker från ett restmaterial i stället för från gruvbrytning. Critical Metals har långtgående planer att påbörja utvinning inom några år med slagg från SSAB och eventuellt även från H2GreenSteel.

Ytterligare geometallurgisk forskning behövs med inriktning mot utvinning av vanadin från både magnetit i gabbrotypen och från alunskiffer. Avgörande är dessutom att klargöra huruvida alunskiffer kan brytas och genom lakning utvinna metaller på ett miljömässigt acceptabelt sätt. Det finns även behov av forskning på möjligheten att utvinna vanadin som biprodukt från malmer av Kirunatyp vid direktreduktion.

Ga, Ge, In: Ingen utvinning av gallium, germanium och indium har skett i Sverige och ingen riktad prospektering mot dessa metaller har heller förekommit. Förutsättningarna för utvinning av gallium, germanium och indium är därför otillräckligt kända då det inte finns någon systematisk analysering av dessa metaller från svenska fyndigheter. Det är mindre troligt att det genom riktad prospektering skulle gå att hitta intressanta nya fyndigheter av ekonomisk storlek i Sverige. Det som skulle kunna ha en potential är troligen utvinningen av gallium, indium och eventuellt germanium från zinkblände som en biprodukt i zinksmältverk. Det förutsätter dock att halterna i zinksligen är tillräckligt

höga och att de tekniska och ekonomiska möjligheterna finns. Något smältverk för zink finns inte i Sverige då Boliden har sina smältverk för zink i Finland (Kokkola) och Norge (Odda).

Möjligen kan det även finnas tekniska och ekonomiska möjligheter att utvinna gallium som biprodukt från LKABs malmer i samband med järnframställningen från magnetit. I båda fallen finns ett behov av att ta reda på halterna i koncentraten av magnetit och zinkblände från olika gruvor, vilket enkelt kan göras, men även av att utveckla de metallurgiska processerna för utvinning av gallium och indium vilket kräver större insatser av teknisk utveckling för att klargöra om det är ekonomiskt möjligt. Förhöjda halter av gallium finns även kopplat till REE-fyndigheter av Basnästyp i Bergslagen och i REE-fyndigheten Norra Kärr. I båda fallen krävs ytterligare kunskap om hur gallium uppträder i fyndigheterna och om det kan ha något ekonomiskt värde som biprodukt.

Grafit: Mindre mängder grafit har tidigare brutits i Sverige och en relativt omfattande prospektering har bedrivits i främst statens regi där de geologiskt mest gynnsamma delarna av Sveriges berggrund undersökts. Då grafitfyndigheter är goda elektriska ledare är de relativt enkla att påvisa med elektromagnetiska geofysiska metoder och därmed är flertalet mer betydande förekomster påvisade men mera sällan närmare undersökta. Kringelgruvan i Hälsingland blev resultatet av prospekteringen på 1980-talet och var i produktion 1996-2001. Ytterligare tre fyndigheter i samma område är belagda med bearbetningskoncession och ägs tillsammans med Kringelgruvan av Woxna Graphite AB som är ett dotterbolag till Leading Edge. Företaget har långt gångna planer på att återstarta gruvan och på sikt kanske även bearbeta de tre övriga fyndigheterna. Även Talga Resources har långt gångna planer på att bryta grafit i Nunasvaara i Norrbotten men har inte ännu fått besked om den under år 2020 ansökt bearbetningskoncessionen. Företaget har även flera liknande grafitfyndigheter i samma område och på några andra platser i Norrbotten där utveckling ligger i en tidigare fas. Genom ytterligare undersökning av redan kända grafitförekomster i främst Norrbotten kan troligen betydande tonnage med ekonomiska halter påvisas. En viss potential för nyfynd kan även finnas i Västernorrland-Västerbotten. Prisbilden för högre grafitprodukter har visat en positiv utveckling sista tiden vilket ger bättre förutsättningar för befintliga projekt liksom stimulans för ytterligare prospektering.

Då grafitförekomster är lätta att påträffa med elektromagnetiska prospekteringsmetoder så finns forskningsbehovet främst inom utvinningsområdet. Ytterligare forskning krävs för att eventuellt förbättra möjligheten att framställa en högren grafitprodukt från finkorniga grafitförekomster. Intressant är även att undersöka om det är möjligt att framställa en grafenprodukt av hög kvalitet. Det skulle höja värdet av grafitförekomsterna påtagligt och även kunna bli basen till en högteknologisk grafenbaserad industri i norra Sverige. Graden av kristallinet kan där vara en faktor av viss betydelse.

Nickel: Mindre mängder nickel har tidigare utvunnits från flera små fyndigheter i Sverige och ett flertal omfattande prospekteringskampanjer har bedrivits i stora delar av landet men inga mera betydande höghaltiga nickelfyndigheter har påträffats. Men det har genererat kunskap om var de mest malmpotentiella områdena finns. Den enda fyndigheten som har en beviljad bearbetningskoncession och där en teknisk-ekonomisk utvärdering gjorts är den mycket stora men låghaltiga fyndigheten Rönnbäcken i Västerbottens fjällvärld. För närvarande drivs inte projektet aktivt framåt vilket delvis kan bero på en mindre gynnsam prisutveckling för nickel och det har nyligen skett förändringar i ägarbildan där BlueLake Mineral AB nu står som ägare. Även en del fyndigheter i nordöstra Västerbotten är relativt väl undersökta och flera av dem har uppskattade mineralresurser men har inte kunnat visas vara ekonomiska på grund av liten storlek och/eller låg halt. Fyndigheterna är belagda med undersökningstillstånd av flera olika aktörer vilket försvårar samordning och helhetsbedömning. Med ett bättre nickelpreis kan projekten eventuellt utvecklas i positiv riktning men även initiera ytterligare prospektering där Norrbottens kustland och Västerbotten förmodligen har störst potential. Vid en eventuell brytning av vanadin i alunskiffer kan även en viss mängd nickel produceras som biprodukt.

Grundläggande forskning saknas i allmänhet om de svenska nickelfyndigheterna och då särskilt i perspektivet malmgenetisk förståelse. Bättre kunskap om betydelsen av värdbergarternas ursprung och karaktär för att bilda ekonomiskt betydelsefulla fyndigheter är önskvärd.

Litium: Litiumhaltiga pegmatiter har varit kända i Sverige sedan början av 1800-talet och en mindre provbrytning av litium har skett i Varuträsk. Under 1980-talet bedrevs en relativt omfattande prospektering i mellersta Norrland och ett flertal fyndigheter påträffades. Den mest lovande var Järkvissle som undersöktes närmare och där en preliminär mineralresursberäkning gjordes. Objektet är nu belagt med undersökningstillstånd av Asera Mining AB men har inte utvecklats vidare. Fyndigheten är för liten för att bära investering i gruva och anrikningsverk och samma gäller fyndigheten Varuträsk i Västerbotten som dessutom har en betydligt lägre halt av litium. Den mest lovande fyndigheten utgörs av Bergby i Gästrikland som belagts med undersökningstillstånd av Leading Edge. Den är ännu inte tillräckligt undersökt för att kunna avgöra dess ekonomiska potential men preliminära resultat visar på ekonomiska halter av litium. Litiumfyndigheter har inga tydliga geofysiska kännetecken vilket gör dem svårprospekterade men det har delvis utvecklats geologisk-geokemisk metodik som kan vara användbar. Det senaste årets mycket dramatiska prisutveckling för litium kan vara tillfällig men även resultera i en långsiktigt något högre prisbild som kan öka intresset för prospektering. De mest lovande områdena utgörs av de östra delarna av Norrland från Gästrikland upp till Norrbotten där flera mindre förekomster redan är kända.

Ytterligare forskning för att bättre kunna ringa in områden som kan innehålla litium-haltiga pegmatiter kan bidra till en mera effektiv prospektering.

En viktig del kan här vara att bättre kunna identifiera litiumhaltiga pegmatiter genom spårelementanalyser av indikatormineral både genom att provta pegmatiter regionalt och genom moränprovtagning regionalt och lokalt.

Liknande behov finns för många andra ICM som inte tagits upp i denna rapport. För vissa metaller och mineral (exempelvis grafit) finns en god kännedom om förekomster, men behov av forskning längre ned i värdekedjan (kring framställning), medan för andra metaller och mineral (exempelvis indium) saknas kunskap kring hur, var och varför koncentrationer bildas, medan framställningen av ett indiumkoncentrat ur zinkmalm är känd. Gemensamt för de flesta ICM, som ofta uppträder i låga halter, är att det krävs forskning inom analysteknik, från regional (geofysisk) skala till nanoskala, för att kunna de-tektera och analysera dem längst hela värdekedjan.

Tabell 2. Uppskattad möjlig produktion av utvalda ICM i Sverige baserat på kända förekomster och möjliga nyfynd.

Metall/mineral	Antal kända nyfyndigheter i produktion inom 3–10 år	Potentiell produktion	Produktion som biprodukt inom 3–10 år	Antal nyfynd+ tidiga projekt i produktion inom 10–20 år	Hypotetisk produktion från nyfynd
Litium	0–1	0–4 000 ton Li ₂ O/år	0	0–3	0–10 000 ton/år
Kobolt	0	0	0–2 000 ton/år	0–2	0–500 ton/år
Nickel	0–2	0–30 000 ton Ni/år	0–2 000 ton/år	0–3	0–20 000 ton/år
Vanadin	0–4	0–20 000 ton V ₂ O ₅ /år	0–15 000 ton/år	0–7	0–50 000 ton/år
Grafit	0–5	0–50 000 ton grafit/år	0	0–10	0–200 000 ton/år
REE	0–2	0–8 000 ton TREO/år	0–4 000 ton/år	0–6	0–30 000 ton/år
Indium	0	0	ovisst	0	0
Gallium	0	0	ovisst	0	0
Germanium	0	0	0	0	0

7 Utmaningar för FoU inom området innovationskritiska metaller och mineral

Den samverkan som idag sker kring forskning och innovation mellan Sveriges universitet och högskolor, gruvbolag och teknikleverantörer är en internationell förebild, med möjlighet till forskningsfinansiering från tex. *SMI, Swedish Mining Innovation*. Men, möjlighet till forskning på metaller och mineral som *inte* ingår i de större företagens rådande strategier (vilket gäller de flesta ICM) är begränsande i Sveriges kunskapsutveckling på det här området. Vi har i Sverige en forskning som integrerar hela värdekedjan från mineralisering till malm, koncentrat och till ren metall, inklusive miljöpåverkan, återvinning och tillvaratagande av restprodukter och minimering av avfall. Men inom denna

värdekedja finns luckor och ett behov av grundläggande forskning inom respektive del i värdekedjan. Av genomförd kunskapsöversikt framgår att det finns en otillräcklig berggrundsgeologisk och malmgenetisk forskningsuppbyggnad i Sverige vad gäller innovationskritiska metaller och mineral, samt kunskapsluckor längst hela värdekedjan. Svensk gruvindustri ligger i framkant vad gäller grön omställning. Den forskning industrin prioriterar och bedriver i samverkan med akademien är i världsklass, men den forskning och kunskapsuppbyggnad som industrin inte prioriterar i dagsläget kommer heller inte att utföras. Svensk forskning om innovationskritiska metaller och mineral riskerar i och med detta att bli kortsiktig och snäv, och kunskapsinhämtning för eventuella framtida behov stagnerar. Några orsaker till detta läge bedöms vara följande:

- Forskningsfinansieringen ställer oftast krav på en hög andel medfinansiering från industri och/eller minst två företag. Längst värdekedjan, i synnerhet i prospekteringsstadiet, råder en hård konkurrens mellan företag och det är därför svårt att övertyga två företag att delta i ett och samma forskningsprojekt. Det rör sig mestadels om mindre prospekteringsföretag som dessutom inte har medel att skjuta till. Detta gör det avsevärt mycket svårare att generera ny kunskap runt de hundratals ICM-fyndigheter som vi känner till men som aldrig undersökts vetenskapligt i modern tid. Därför har vi i Sverige en bristande kunskap om vilka volymer av metaller det rör sig om och möjligheten till faktisk utvinning av kända fyndigheter och restavfall. Det vi kan säga, baserat på den geologiska kunskap som finns i dag är att det finns en stor potential för ICM-mineraliseringar i svensk berggrund och en förmodad god potential för utvinning. Dock går det inte att uttala sig i mer detalj om potentialen för utvinning och produktion då grundläggande information saknas.
- Större företag som LKAB och Boliden AB undersöker förekomst och möjlig utvinning av ICM i sina restprodukter (ofta ihop med universiteten) men prospekterar inte efter dessa metaller. Det innebär att forskning inom värdekedjan utgår ifrån vad de stora företagen är intresserade av i dagsläget. Utifrån företagets prioriteringar (vilket mestadels är en mer hållbar och kostnadseffektiv utvinning av huvudprodukter), bedrivs marginellt med forskning på kunskapsuppbyggnad om ICM i den svenska berggrunden.
- Sedan den statliga prospekteringen upphörde för 30 år sedan har prospekteringen av den svenska berggrunden minskat och bidrar därmed inte till ny kunskap. Prospektering har till största delen skett kring redan kända mineraliseringar, vilket medför att det genereras få nya objekt och att stora områden fortfarande aldrig är undersökta. Mindre prospekteringsföretag driver inte själva en kunskapsutveckling. Dessutom kan vi konstatera att antalet privata aktörer som ansöker om tillstånd för prospektering eller

bedriver prospektering har minskat markant, vilket kan ha att göra med tillståndsprövningarnas långa handläggningstider.

- SGU utför *insamling av geologisk information*. Denna information ger inte svar på huruvida en ICM-fyndighet kan bli brytvärd eller ej, hur närliggande vattendrag påverkas av att de bryts, eller om metallerna alls går att utvinna från sitt värdmineral på ett hållbart sätt. Det finns ingen tradition i Sverige av utvinning av dessa metaller och vi vet för lite om grundläggande mekanismer som tex. hur ICM koncentreras till malmer i jordskorpan, hur de transporteras vid vittring av gruvavfall och fastläggs i naturen, eller hur ICM kan kontrolleras i olika mineraltekniska och metallurgiska processteg. För att stärka universitetens forskning inom området ICM så bör SGU kunna förse universiteten med högkvalitativ, grundläggande geologisk information. Denna typ av kartläggning bedrivs inte av några andra aktörer i Sverige och således uteblir denna essentiella information om inte SGU har resurser att utföra dem. SGU:s uppdrag bidrar således med mycket information som *om den beforskas*, ökar möjligheterna för identifikation av nya potentiella förekomster och därmed även främjar framtida utvinning av mineral som behövs för grön omställning. Myndigheten bedriver inte denna typ av forskning inom ramarna för verksamheten, och har svårt att möta detta stora behov med sina begränsade resurser för geovetenskaplig forskning.

En hållbar och cirkulär mineralnäring ställer krav på grundläggande kunskaper om metallernas fördelning i berggrunden och deras egenskaper i naturliga och anrikningstekniska processer. Detta gäller i synnerhet ICM som universitet och högskolor inte har en lång tradition av att studera. En utmaning för en hållbar och cirkulär mineralnäring är att bygga upp en grundläggande förståelse för just dessa metaller, som sedan har direkt bäring på tillämpad forskning och innovation. Utan den grundläggande forskningen (TRL 1-2)¹¹⁹ på ICM längst hela värdekedjan, så riskerar forskning på TRL 8, 9 och 10 att försvinna på tio års sikt.

8 Litteratur

Bedini, E., Rasmussen, T.M. Use of airborne hyperspectral and gamma-ray spectroscopy data for mineral exploration at the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland. *Geosci J* 22, 641–651 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s12303-017-0078-5>

Claeson, D. (ed.), 2020: Innovationskritiska metaller och mineral i Bergslagen. RR 2020:02, Sveriges geologiska undersökning, 1–77.

¹¹⁹ Technology Readiness Level (TRL) är en beteckning för en teknologis mognadsgrad och tillhörande teknologisk risk. Inom forskningsintensiva verksamheter används teknikmognadsnivåer för att bekräfta vilka aktiviteter som behövs för att implementera forskningsresultaten i nya produkter/processer.

Eilu, P. (ed.) 2012. Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. Geological Survey of Finland, Special Paper 53, 401 pages.

Eilu, P., Bjerkgård, T., Franzson, H., Gautneb, H., Häkkinen, T., Jonsson, E., Keiding, J.K., Pokki, J., Raaness, A., Reginiussen, H., Róbertsdóttir, B.G., Rosa, D., Sadeghi, M., Sandstad, J.S., Stendal, H., Þórhallsson, E.R. & Törmänen T. 2021. The Nordic supply potential of critical metals and minerals for a Green Energy Transition. Nordic Innovation Report. ISBN 978-82-8277-115-3 (digital publication), ISBN 978-82-8277-114-6 (printed).

European Commission (2020). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. EU Publications, COM (2020) 474 final, 23 p.

Geijer, P. & Magnusson, N. H. (1944). De mellansvenska järnmalmernas geologi. Sveriges geologiska undersökning, serie Ca 35. 654 p.

Grip, E. & Frietsch, R. (1973). Malm i Sverige 2 Norra Sverige. Almqvist & Wiksell. 295 p.

Hallberg, A., Reginiussen, H. (2020). Critical raw materials in ores, waste rock and tailings in Bergslagen. SGU rapport 2020:38, 42 p

Hallberg, A. & Reginiussen, H., (2018). Kartläggning av innovationskritiska metaller och mineral. Slutrapportering av regeringsuppdrag. RR 2018:05, Sveriges geologiska undersökning, 1–90.

Hallberg, A. & Reginiussen, H., (2019). Mapping of innovation-critical metals and minerals. SGU report 2019:20, Sveriges geologiska undersökning.

IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

Jonsson E, Högdahl K (2019) On the occurrence of gallium and germanium in the Bergslagen ore province, Sweden. GFF 141: 48-53

Lauri, L., (2018). Identification and quantification of primary CRM resources in Europe. Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 730227. 63 p.

Lejon, H., Forsbacka, K., Johansson R. (2020). Utvinning ur alunskiffer Kunskapsammanställning om miljörisker och förslag till skärpning av regelverket (SOU 2020:71). 213 p.

Lundegårdh, P. H. (1971). Nyttosten i Sverige. Stockholm. Almqvist & Wiksell, 271 p.

Magnusson, N. H. (1973). *Malm i Sverige 1, mellersta och södra Sverige*. Stockholm: Almqvist & Wiksell. 320 p.

Mineralmarknaden 2020. Tema kobolt. SGU Periodiska publikationer 2021:1. 68 p.

Minz F, Bolin NJ, Lamberg P, Bachmann K, Gutzmer J, Wanhainen C (2015) Distribution of Sb minerals in the Cu and Zn flotation of Rockliden massive sulphide ore in north-central Sweden. *Minerals Engineering* 82: 125-135

Pell, R., Tijsseling, L., Goodenough, K. et al. (2021) Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nat Rev Earth Environ* 2, 665–679. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00211-6>

Sahlström, F., Jonsson, E., Högdahl, K., Troll, V. R., Harris, C., Jolis, E. M. & Weis, F. (2019) Interaction between high-temperature magmatic fluids and limestone explains 'Bastnäs-type' REE deposits in central Sweden. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/s41598-019-49321-8

Sadeghi, M. (2019). Rare elements distribution, mineralisation and exploration potential in Sweden. *SGU, Rapporter och meddelanden* 146, 168 p.

Sundius, N. (1951). Kvarts, fältspat och glimmer samt förekomster därav i Sverige. *Sveriges geologiska undersökning C* 520, 231 p.

Svemin (2021) Klimatambitioner och metallbehov, https://www.svemin.se/cdn.triggerfish.cloud/uploads/2021/09/klimatambitioner-enkelsidor_for-print_final.pdf

Tegengren, F.R. (1924). Sveriges ädlare malmer och bergverk. *Sveriges geologiska undersökning Ca* 17, 1–406.

Wanhainen C, Nigatu W, Selby D, McLeod C, Nordin R, Bolin N-J (2014) The distribution, character, and rhenium content of molybdenite in the Aitik Cu-Au-Ag-(Mo) deposit and its southern extension in the northern Norrbotten ore district, northern Sweden. *Minerals* 4: 788-814

Wanhainen C, Pålsson B, Martinsson O, Lahaye Y. (2017) Rare earth mineralogy in tailings from the Kiirunavaara iron ore, northern Sweden: implications for mineral processing. *Minerals & Metallurgical Processing* 34, 189-200

Warlo, M., Bark, G., Wanhainen, C., McElroy, I., Björling, A., & Johansson, U (2021) Extreme-Resolution Synchrotron X-Ray Fluorescence Mapping of Ore Samples. *Ore Geology Reviews* 140: 104620. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104620>

BILAGA 2

FoU om återvinning av innovationskritiska metaller och mineral

Sammanställning av viktigare slutsatser från forskning och utveckling vid universitet, högskolor, forskningsinstitut och industri inom området återvinning av innovationskritiska metaller och mineral med fokus på utveckling och framtida lösningar

Teodora Retegan Vollmer

biträdande professor, kärnkemi

Christian Ekberg

professor, industriell materialåtervinning och kärnkemi

Syfte med uppdraget

Uppdraget omfattar en sammanställning av viktigare slutsatser från forskning och utveckling vid universitet, högskolor, forskningsinstitut och industri inom området återvinning av innovationskritiska metaller och mineral med fokus på utveckling och framtida lösningar. Olika frågeställningar att besvara är följande:

- Ge exempel inom forskningsfältet återvinning av innovationskritiska metaller och mineral på framkomna resultat, lovande resultat eller kommande projekt som rör återvinning av produkter och material. Det kan vara exempel från universitet, högskolor, institut och industri såväl i Sverige som internationellt.
- Att ge en generell beskrivning över vilken FoU som bedrivs vad avser återvinning av innovationskritiska metaller och mineral.
- I möjligaste mån ge en bedömning - utifrån de FoU-rön som nu finns – om hur återvinning kan vara en substantiell väg för att möta behovet av kritiska metaller och mineral.
- Om möjligt ge exempel på och slutsatser av FoU av olika styrmedel som har syftet att främja återvinning av innovationskritiska metaller och material.

Avgränsning av uppdraget vad gäller olika metaller och mineral.

Översikten avgränsar sig till ett urval metaller som är relevanta för s.k. klimatteknologier (t.ex. batterier, vindkraft, solenergi, vätgas) och där FoU finns att redovisa. Som en avgränsning ska uppdraget huvudsakligen redovisa FoU-rön kring ämnena kobolt, litium, indium, molybden samt alla sällsynta jordartsmetaller (REE). Det går även att redovisa resultat även för andra innovationskritiska metaller och mineral om det skulle framkomma under uppdragets genomförande.

Det är inte görligt inom ramen för befintliga resurser med en heltäckande översikt, utan avsikten är att, givet befintliga resurser, redovisa viktigare slutsatser från forskning och utveckling.

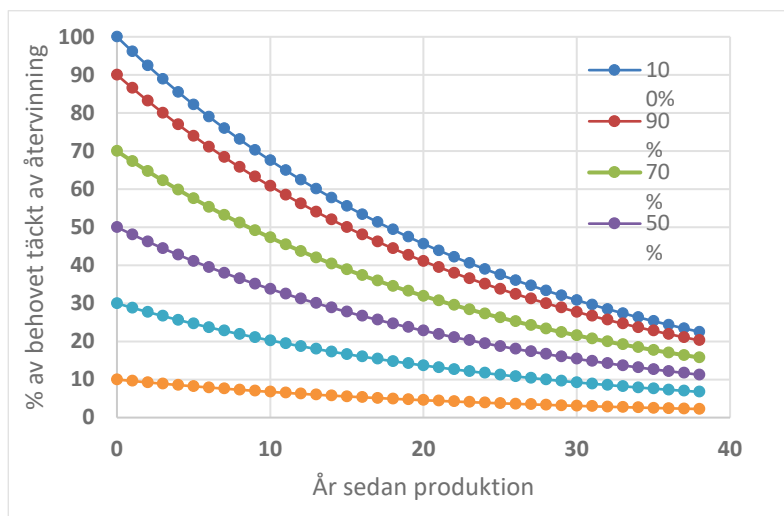
1 Inledning

Återvinning och återanvändning har fått ett uppsving i vårt samhälle på senaste tid då det blivit uppenbart att vår slit- och slängmentalitet inte är hållbar på något sätt egentligen. Gamla soptippar har till exempel blivit gruvor i vår jakt på metaller. Det är också tydligt att gruvor som tidigare ansågs uttjänta nu tas i drift igen. Detta skulle kunna tänkas bero på bättre tekniker för extraktion av de berörda metallerna, men oftast är det helt enkelt så att även med den traditionella tekniken så är nu priserna på metaller på en nivå som gör det lönsamt att öppna igen.

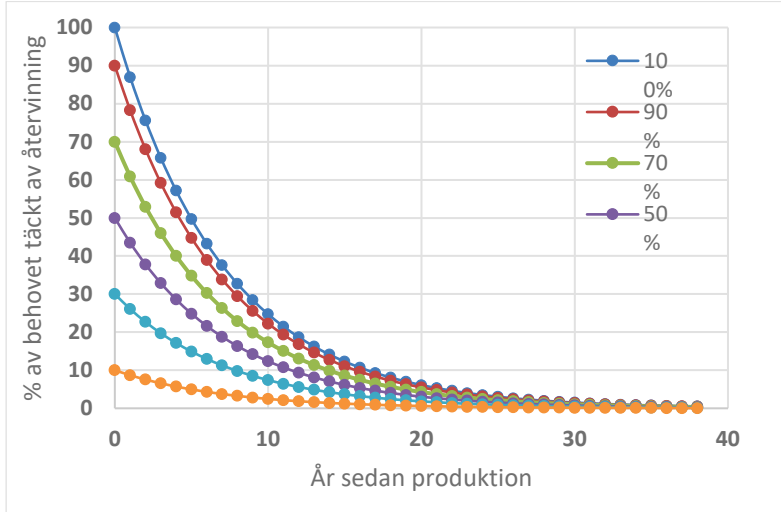
Är då återvinning av metaller något nytt? Nej, egentligen inte alls. Metaller i sin rena (ooxiderade form) har alltid ansetts som värdefullt. På bronsåldern återvann man allt brons man kunde (som inte blev värdefullt offer till gudarna) och denna tradition fortsatte, men med järn på vikingatiden. Att ha ett svärd i rent järn var en klenod. Rustningar i metall var dyra etc. Allt eftersom gruvbrytningen blev lättare och snabbare i och med industrialiseringen, men även före, blev också metallernas allmänvärde lägre. Fler och fler kunde använda metaller i det dagliga livet. Det blev också ganska tidigt ett skifte från främst järn, guld och silver till andra metaller med andra tillämpningar. På senare tid har de sällsynta jordartsmetallerna hamnat i fokus och just på den sidan är återvinningen dålig, mindre än 5%, medan återvinningen av bulkmetaller som järn och koppar är industriellt mogna processer.

En viktig fråga i sammanhanget är huruvida vi kan tillgodogöra oss återvinningen som en viktig del i att nå ett cirkulärt samhälle. Svaret på den frågan är i bästa fall – delvis. Som framgår ur Figur 1 och 2 nedan är den viktiga faktorn att få ned för att nå ett cirkulärt samhälle tillväxten som kräver mer och mer material.

Figur 1. Procent som täcks av återvinning för olika återvinningsgrader vid 4% tillväxt



Figur 2. Procent som täcks av återvinning för olika återvinningsgrader vid 15% tillväxt



Om man nu studerar Figur 1 ser man att för en normal tillväxt på 4% per år och en återvinningsgrad på det i princip omöjliga 100% så täcker återvinningen maximalt 70% av behovet om produkten har en livslängd på 10 år. För mer innovationskritiska metaller såsom t.ex. litium är tillväxten väsentligt högre och då framgår det ur Figur 2 att efter 10 år täcker 100% återvinning endast 25% av behovet.

Dessvärre kan man se att allteftersom tillväxten kräver att fler och fler prylar kommer ut på marknaden samtidigt som råvarupriserna ökar så tenderar tekniken att utvecklas mot ett läge där mindre och mindre av de dyrbara metallerna finns i varje produkt. Detta i sin tur är ett tveeggat svärd då det i princip innebär att återvinningen blir mer och mer komplicerad. Det kan te sig motsäggelsefullt, men inte desto mindre sant, att ju mindre metaller man har i varje produkt desto mindre återvinns totalt sett och desto mer hamnar i diverse avfallsströmmar som saknar metallåtervinning som en del i processen. Det är helt enkelt för dyrt och komplicerat att återvinna de små mängderna (i varje produkt) från dessa komplexa (men ganska stora) materialflöden.

Det är vanligt att man diskuterar mognadsgraden vid processutveckling via en skala som kallas TRL (Technological Readiness Level). Denna skala utvecklades ursprungligen vid NASA i USA men har sedan anpassats för allmän processutveckling inom t.ex. EU. Den har nio steg och man kan då jämföra olika processers utvecklingsgrad och i någon mån också se hur långt bort man anser att en verklig tillämpning ligger. Det är också bra att följa denna skala när man utvecklar processer då man på det sättet kan säkerställa god spårbarhet och tydlighet. Nivåerna är enligt Tabell 1 nedan.

Tabell 1. De olika nivåerna i TRL-skalan

TRL	Innebörd
1	Grundforskning
2	Ett teknologikoncept finns formulerat
3	De grundläggande principerna visas på laboratorium
4	Teknologin bekräftad på laboratorium
5	Teknologin validerad i relevant miljö
6	Teknologin demonstrerad i relevant miljö
7	Systemprototyp testad i relevant miljö (pilot)
8	Systemet komplett och bekräftat
9	Systemet beprövat i relevant miljö (mogen teknik)

Det är alltså ganska tydligt vilka steg som är nödvändiga att ta. För att en industri skall tillämpa en teknik bör man ha nått minst TRL8.

Man bör alltså se denna rapport som ett led i att kartlägga läget på metallåtervinningen i världen, Europa och Sverige eftersom vi lever i ett globalt samhälle där både produkter och råvaror kommer från hela världen. Naturligtvis inställer sig då problemet var man anser att forskning bedrivs. Vi har försökt att hantera detta på EU-nivå genom att ta med projekt med svenska deltagare, liksom svenska projekt. Detta är viktigt då antalet platser där verklig återvinningsforskning utföres med mål att utveckla fungerande processer är mycket få i Sverige. Detta gäller även den inhemska finansieringen för dylika projekt. Man kan se att en överväldigande del av finansieringen går till systemstudier, snarare än utveckling av processer. Vi har valt att fokusera på endast några metaller, nämligen kobolt, litium, indium, molybden samt alla sällsynta jordartsmetaller (REE). I varje kapitel går vi igenom några användningsområden etc för att först ge en bild av den samhällseliga nyttan och sedan hur och om de återvinns. Vi måste i detta sammanhang minnas att det är just produkterna som är återvinningsgruva. Detta skapar i sig en utmaning när det gäller de utvecklande processernas flexibilitet vilket också diskuteras. I förekommande fall kommer vi att försöka ange TRL för antingen specifika processer eller för ämnet som helhet.

2 Kobolt

2.1 Användning och återvinning

Kobolt används i ett tämligen brett spektrum av produkter och huvudsakligen i diverse kemiska föreningar eller i metallisk form. Ett av de mer kända användningsområdena för koboltföreningar idag är i ett flertal olika batterikemikalier såsom katodmaterial i Li-jon batterier eller anodmaterial i NiMH-batterier. I detta sammanhang anses kobolt ofta som den begränsande metallen för massproduktion av batterier till rimliga priser. Andra vanliga produkter är som additiv i olika keramiska material eller i pigment. Dessa produkter spelar dock

mindre roll för diskussionerna kring återvinning av kobolt. (Hamut, 2017), (Ogura & Kolhe, 2017), (Llusar et al., 2001), (Delorme et al., 2017).

Metallisk kobolt ingår i ett antal olika så kallade superlegeringar, slitstarka koboltbaserade legeringar, kända som Stellites, och även i biokompatibla legeringar av Co-Cr-Mo (Campbell, 2008).

Beroende på i vilken kemisk form, kobolt befinner sig i produkterna samt huruvida det är en del eller huvudkomponent påverkar tydligt möjligheterna till effektiv återvinning och så även de tekniker som används.

På grund av den förväntade ökningen av batterier i världen är koboltåtervinningen från just batterier det som fått mest fokus på senare tid. Just nu är huvudspåret återvinning från katoderna i Li-jonbatterier. I dessa återfinns kobolt som litiumkoboltoxid, LiCoO_2 , eller dess varianter litium-nickel-koboltaluminiumoxid eller litium-nickel-mangan-koboltoxid. Dessa material är också viktiga källor för återvinningen av flera andra metaller såsom litium, nickel och mangan.

Återvinningen av kobolt från ett sorterat batteriavfall genomförs oftast genom pyrometallurgiska eller hydrometallurgiska tekniker, d.v.s. genom smältning eller lakning. Mycket av arbetet inom detta område har koncentrerats på lakning i kombination med en reduktiv behandling av den lösta kobolten för att optimera förutsättningarna för ett maximalt utbyte, t.ex. (Meng et al 2018), (Peng et al 2018), (Meng, Zhang & Dong, 2017), (Albler et al 2018), (Torkaman et al 2017), (Rodrigues & Mansur, 2010), (Wang et al., 2017), (Takacova et al 2016).

Ett proof-of-concept har också genomförts för en pyrometallurgisk väg för att återvinna kobolt (Georgi-Maschler et al 2012). Utöver dessa har några framgångsrika försök att återvinna elektrodmaterial, LiCoO_2 , genom "solid-state-synthesis" rapporterats (Pegoretti et al 2017), (Sita et al 2017).

Om man går tillbaka lite i tiden till 1998 så täckte superlegeringar 44 % av koboltanvändningen i USA (Shedd, 1998) med flyg- och energiproduktion som de viktigaste konsumentsektorerna (Srivastava et al 2014). Trots den senare uppkomsten av batterirevolutionen är det tydligt att superlegeringar är en viktig användningskategori för kobolt (Ferron, 2016). När det gäller koboltbaserade legeringar finns det redan välfungerande återvinningsteknik, men det finns naturligtvis fortfarande flera utmaningar att övervinna för en mer effektiv och selektiv återvinning.

I legeringar kan återvinningen av materialet enklast göras vid källan, det vill säga där en legering gjuts eller bearbetas. Detta är vanligt på tydligt dedikerade platser och företag vilket gör insamlingen av skrot för återvinning relativt enkel. Det enklaste sättet att återvinna kobolt är att omsmälta skrotet direkt förutsatt att det insamlade materialet håller en önskvärd kvalitet med avseende på koboltinnehåll och övriga metaller. Ej heller bör materialet innehålla skadliga element såsom t. ex. poleringskorn eller skäroljor. (Ferron, 2016) Mer om det nedan.

I övrigt kan man säga att de viktigaste teknikerna för att återvinna superlegeringsskrot och till och med koboltkatalysatorer är precis som i fallet med

batterimaterial genom pyrometallurgi, hydrometallurgi och deras kombinationer. Viktiga frågor som ofta diskuteras och undersöks här är miljöfarlighet och energiintensivitet.

Återvinningen av superlegeringar är i allmänhet komplicerad eftersom typiska superlegeringar innehåller mer än 20 legeringselement och att ta hänsyn vid återvinning av varje enskilt element som ingår i legeringen är mycket krävande. Till exempel, 1998 i USA, d.v.s. före batteriteknikens boom, var återvinningseffektiviteten för koboltskrot 68 % (Shedd, 1998). Här täckte koboltskrotet superlegeringsdelar, hårdmetalldelar, magneter, förbrukade katalysatorer och andra metallprodukter men det framhölls tydligt att en del av det återvunna skrotet genomgick en nedgradering, dvs spädning till en nivå där dess egenskaper inte utnyttjas fullt ut (legeringselement i t.ex. stål). En fråga som direkt bidrar till återvinningsgraden är dessutom mängden producerat skrot. Det är erkänt att superlegeringsindustrin släpper ut en stor mängd skrot: komponenter kan ha ett slutproduktutbyte på mindre än 10 % på grund av bearbetning och smide (Srivastava et al., 2014).

För Stellite, d.v.s. hårdmetall- eller hårdmetallstrukturer delas återvinningsprocesserna som direkta eller indirekta:

Direkta metoder inkluderar kallströmsprocesser, såsom gasförstoftning men utförd vid lägre temperaturer och zinksmältprocesser där materialet nedsänks i smält zinkbad för att sedan reagera selektivt med kobolt för att skapa en porös struktur från vilken zinken kan värmas upp och tas bort samt Co- och WC-pulver separerade (Katiyar et al 2014), (Kim, Seo, & Son, 2014), (Hämäläinen & Isomäki, 2005).

De indirekta återvinningsmetoderna involverar sekventiella steg av torra och våta processer såsom klorering, oxidation-alkalisk urlakning och oxidation-reduktion för att möjliggöra selektiv återvinning av de element som ingår i materialet (Katiyar et al., 2014), (Kim et al., 2014). Att hitta den optimala kombinationen av processer och processparametrar har under de senaste åren mobiliserat en betydande forskningsansträngning. (Kim et al., 2014), (JC Lee et al., 2011), (Kücher et al 2018), (Xi et al 2017). Dessvärre ger fortfarande många av processerna fortfarande mycket låga koboltutbyten, t.ex. (Lee et al 2017).

Nya siffror visar att återvinningsgraden (End of life Recycling rate, EOL-RIR) för kobolt är 35 %. Det är trots detta beskedliga värde den tredje högst bland de kritiska råvarorna (CRM) efter vanadin (44 %) och volfram (42 %). Detta beror dock främst på att kobolt används i så stor utsträckning i batteriapplikationer och den befintliga avfallslagstiftningen som kräver insamling av uttjänta batterier. Men fortfarande hamnar mycket av avfallet av kobolt i t.ex. deponi. (Mathieux et al., 2017).

2.2 Begränsningar i dagens återvinning

Som diskuterats ovan är teknikerna som används vid koboltåtervinning från olika produkter delvis liknande. Detta gäller särskilt vid återvinning av kobolt

från batterielektroder och superlegeringsskrot men när de hårda volframkarbiderna ingår blir processerna och teknikerna mer komplexa. Teknikerna finns alltså, om än med varierande avkastningsgrad och ekonomisk genomförbarhet.

De luckor som är begränsande för en effektiv återvinning av kobolt är tillämpningsberoende. Eftersom batterier är det stora fokusområdet idag är det ofta det som belyses.

Vid återvinning av batterier är huvudmålen separation och återvinning av batterikomponenter samt avlägsnande av avfall från miljön. Följande problem har identifierats i batteriåtervinningen:

- a) Den låga insamlingsgraden för batterier.
- b) Den inneboende säkerhetsrisken på grund av batteriernas höga reaktivitet.
- c) Marknaden är i kontinuerlig utveckling med tillkomst av många nya kemi- och elektrodmaterial.
- d) Parallell användning av olika elektrolyttyper och sammansättningar i batterier vilket gör det utmanande att utveckla en universellt giltig och ekonomiskt genomförbar återvinningsprocess.
- e) Återvinningen omfattar för närvarande mestadels bärbara batterier för hemelektronik på grund av en begränsad produktion av batterier för t.ex. elfordon (EV). Detta anses dock öka exponentiellt.

Den varierande mängden av kobolt i olika produkter och då speciellt stållegeringar kan också påverka strävan mot återvinning även om teknikerna i princip finns.

2.3 Exempel inom forskningsfältet

Återvinning av kobolt från batterier är en mycket välrepresenterad sektor med många nationella och internationella/europeiska projekt av vilka de flesta har nått en hög mognadsnivå, till exempel TRL 6 till 9 när det gäller återvinning av bilbatterier.

I Sverige har återvinningen av bland annat kobolt mestadels från förbrukat batteriavfall traditionellt drivits av till exempel Chalmers universitet vilket lett till framgångsrika projekt och på sistone med Northvolt (<https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>) där Northvolt recycling programmet, Revolt, har producerat sin första battericell med 100 % återvunnet nickel, mangan och kobolt; av KTH i batteriåtervinningsprojektet (<https://www.kth.se/sv/ket/resource-recovery/recycling-of-batteries-1.938983>); av Uppsala universitet genom BASE kompetenscenter (<https://www.batteriessweden.se/>) där målet är att främja batteriforskningen såväl som återvinningen; av SWERIM genom NEXT-LIB-projektet (<https://www.swerim.se/en/next-lib>) som syftar till återvinning av Li-Ion-batterier (där Co också är en av komponenterna).

En mycket mer omfattande analys av tidigare och nuvarande återvinning av batterier (och implicit kobolt) i Sverige finns i rapporten ”State-of-the-art in

reuse and recycling of lithium-ion batteries – A research review”, av Hans Eric Melin från 2019 (Melin, 2019).

Inom EU har koboltåtervinningen från ett antal olika produkter varit pågående sedan de tidiga ramprogrammen fram till det nuvarande Horizon Europe som just har startat. All information om dessa projekt finns samlade i en plattform som kallas CORDIS vilken är sökbar med stor detaljrikedom. De flesta projekten har startat som forskningsprojekt med någon liten grad av tillämpning (tidigt i FP7-programmen) och några av dem har nått mognad genom att antingen nå en mycket hög TRL (6-8) eller genom marknadsimplementering (TRL9) (Horizon 2020). För närvarande kan 47 projekt som handlar om återvinning av kobolt identifieras, se (Cordis, 2021) såväl som i (Melin, 2019).

3 Litium

3.1 Användning och återvinning

Efterfrågan på litium drivs huvudsakligen av batterimarknaden (54 % av den totala efterfrågan 2019), medan traditionella användningar såsom läkemedel, glastillverkning och andra kemikalier minskar i jämförelse år efter år (Jacobi, 2019). Tillväxttrender för litiumefterfrågan in i framtiden drivs på liknande sätt av applikationer för litiumjonbatterier (LiB), som beräknas använda 76 % av den totala efterfrågan på litium till 2025 (Willuhn, 2020), (Roskill, 2020). I batterier används i huvudsak litium som hydroxid eller karbonat. Detta innebär att efterfrågan på just dessa former antas öka avsevärt vilket också kommer att återspeglas i vilken form man avser att producera återvunnet litium. Det är en ganska stor fördel för återvinningsprocessernas energianvändning då framställning av litiummetall är tämligen energikrävande jämfört med energiåtgången för att producera de ovan nämna salterna (Albermarle, 2019).

Renheten hos litium är mycket viktig i batteriapplikationer eftersom det i hög grad påverkar batteriets hastighetskapacitet och livslängd. Till exempel säljs litiumkarbonatpulver för batteritillverkning i allmänhet med en renhet på 99,95 % eller mer vilket också ställer stora krav på återvinningsprocesserna (Tagray, 2020).

I batterier återfinns litium oftast i katoden, elektrolyten och i vissa begränsade fall i anoden. Litium är en del av det elektrokemiskt aktiva pulvret i katoden och beroende på batterityp finns i en mängd olika kemier. De viktigaste ämnesgrupperna är litiumkoboltoxid (LCO), litiumnickelmangankoboltoxid (NMC), litiumnickelkoboltaluminiumoxid (NCA), litiummanganoxid (LMO) eller litiumjärnfosfat (LFP). Framtida efterfrågan lutar mot mer av NMC- och NCA-typ (Azevedo, 2018). Pulvret blandas sedan med kimrök och limmas till en aluminiumfolieströmvätagare med en polymer förening, såsom PVDF. Anoder består huvudsakligen av grafit samt innehåller PVDF och kopparfolie. På senare tid har även tillsatser av andra ämnen i anoden undersökts såsom kiselbaserade legeringar och nanostrukturerad litiumtitanit för att öka den specifika energin (Battery, 2021). De icke-vattenhaltiga elektrolyterna är

vanligtvis en blandning av organiska karbonater såsom etylenkarbonat eller dietylkarbonat innehållande komplex av litiumsalter såsom litiumhexafluorofosfat (LiPF₆), litiumhexafluorarsenatmonohydrat (LiAsF₆), litiumperklorat (LiClO₄), litiumperklorat (LiClO₄), och litiumtriflat (LiCF₃SO₃). Komponenterna lindas sedan tätt eller staplas och packas säkert i en plast- eller aluminiumlåda. Batteripaket inkluderar även sensorer, säkerhetsanordningar och kretsar som styr batteridriften, vilket lägger till ytterligare ett lager av komplexitet på sortering och förbehandling innan den kemiska återvinningen kan starta. Sammantaget är litiumbatterier kompakta, komplexa och finns i en mängd olika former och storlekar som vanligtvis inte är designade för att demonteras, vilket ytterligare komplicerar återvinningen av litiumbatterier (Jacoby, 2019).

De rapporterade återvinningsgraderna för LiBs på 5 % är mycket låga. Detta är dock inte helt korrekt eftersom det mesta exporteras till Kina för rekonditionering/återvinning och deklarerar istället som export istället för avfall. I Kina rekonditioneras LiB:erna för "second life"-applikationer såsom i powerbanks och annan energilagring och redovisas därför inte i återvinningsstatistiken. Circular Energy Storage, ett konsultföretag, har uppskattat att 97 000 ton återvanns/återanvänds 2018 varav 67 000 ton i Kina och 18 000 ton i Sydkorea. Globalt finns det över 50 företag involverade i återvinning av LiBs med Kina innehavande den största marknadsandelen. Konkurrensen bland återvinningsföretagen om batterier som ska återvinnas är enligt uppgift mycket hög och varje cellkemi har positiva marknadsvärden i Kina. Detta tyder på att det finns en efterfrågan och att återvinning kan vara ekonomiskt genomförbart (Melin, 2019).

Litiumåtervinning kan vara en omständlig process och, som beskrivs i (Balachandran, 2021), kanske hydrometallurgiska processer inte är svaret på hur man återvinner denna metall. En kombination av förbehandlingsmetoder och separation av Li före någon annan kemisk separation kan vara vägen framåt.

Det pågår mycket forskning både i Sverige och i världen och kunskapen och investerade forskningsmedel är mycket höga.

3.2 Begränsningar i dagens återvinning

Det finns betydande luckor för att närma sig god återvinning av litium ur kemisk synvinkel och mer forskning behövs för en hållbar och effektiv återvinning. Det finns plats för förbättringar i redan befintliga processer i laboratorie- eller pilotskala och säkerheten för förbehandlingen kan fortfarande vara ett problem för en storskalig återvinning på grund av den höga energitätheten och riskerna för explosion och brand.

Den snabba ökningen av apparater som innehåller små litiumbatterier leder till ökad insamling av sådana batterier men det segmentet ses inte som en pålitlig eller önskvärd källa för återvinning. Huvudsakligen för att dessa batterier återfinns i en uppsjö av storlekar och kemier vilket gör effektiv sortering besvärlig. Metoder som baseras på total smältning föredras därför ofta vilket

resulterar i en begränsad effektivitet av litiumåtervinningen. Snarare är de större batterier från elfordon är mer intressanta på grund av högre mängd Li. För att övervinna denna lucka har flera projekt ägnat sig åt att både hantera de små litiumbatterierna såväl som de större elbilarna.

3.3 Exempel inom forskningsfältet

Litiumextraktion, användning och återvinning har nått en enastående mognad på bara några år och drivs av behov i global skala. Den snabba utvecklingen av de elektriska fordonen som drivs av Li-ion-batterier har drivit på tankar om återvinning redan vid tillverkningen. Detta verkar möjligt då utvecklingen gått så snabbt så återvinningsforskningen inte behöver vara reaktiv utan i stället kan vara proaktiv. Detta betyder att just när det gäller denna typ av återvinning kan man koppla designforskningen till återvinningen på ett produktivt sätt.

Återvinningen av litium är en mycket väl representerad sektor med många nationella och internationella/europeiska projekt av vilka de flesta har nått en hög mognadsnivå. Till exempel TRL 6 till 9 vid återvinning av bilbatterier vilket ofta sker tillsammans med koboltåtervinning. Ofta är det den senare som är det som är lönsamt och därför även möjliggör litiumåtervinningen.

När det gäller forskningsverksamheten i Sverige är den snarlik för litium som för kobolt när det gäller batterier som råmaterial. Verksamheter pågår på flera ställen varav några kan nämnas såsom till exempel Chalmers vilket lett till framgångsrika projekt och på sistone med Northvolt (<https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>) där Northvolts återvinningsprojekt, Revolt, har producerat sin första battericell med 100 % återvunnet nickel, mangan och kobolt. På KTH kan man se litiumåtervinning i batteri-återvinningsprojekten (<https://www.kth.se/sv/ket/resource-recovery/recycling-of-batteries-1.938983>).

På Uppsala universitet sker mycket arbete genom BASE kompetenscenter (<https://www.batteriessweden.se/>) där målet är att främja batteriforskningen såväl som återvinningen. Även batteriprojekten på SWERIM genom t.ex. NEXT-LIB-projektet (<https://www.swerim.se/en/next-lib>) som syftar till återvinning av Li-Ion-batterier.

En mycket mer omfattande analys av tidigare och nuvarande återvinning av batterier (och implicit litium) i Sverige finns i rapporten ”State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – A research review”, av Hans Eric Melin från 2019 (Melin, 2019).

En annan rapport som rekommenderas visar också fallet med återvinning av batterier i Norden, per land ur ekonomisk synvinkel. (Energimyndigheten, 2021)

Återvinning av litium från olika strömmar (batteri, gruvdrift, etc) har genomförts inom Europa och under Europeiska unionens paraply i projekt som sträcker sig från tidiga program till det nuvarande (Horizon Europe som just har startat) och samlas in på CORDIS plattformen. De flesta av projekten har, precis som för kobolt, startat som grundforskningsprojekt (tidigt i FP7-

programmen) och några av dem har nått mognad genom att antingen nå en mycket hög TRL-nivå (6-8) eller genom marknadsintroduktion (TRL9) (Horizon 2020). För närvarande kan 67 projekt som handlar om återvinning av litium identifieras, se (Cordis, 2021), samt i (Melin, 2019).

4 Indium

4.1 Användning och återvinning

På grund av dess egenskaper används indium i ny teknik och då mest i form av indium-tennoxid (ITO) i platta bildskärmar som används i tv-apparater, bärbara datorer och mobiltelefoner men också i lödningar och solceller. Andra mindre användningsområden inkluderar termiskt gränssnittsmaterial i elektronik, i alkaliska batterier som ersättning för kvicksilver, legeringar med låg smältpunkt och InGaN-halvledare i lysdioder. Inom en snar framtid förväntas efterfrågan på indium fortsätta att växa och då mest på grund av en ökande marknad av PV-celler och LED-produkter (Pavel et al 2016).

Även om återvinningen från uttjänta produkter är mycket låg återvinns en viss del av indium från tillverkningsavfallet (nytt skrot). Länder som producerar indium-tennoxid har avsevärt ökat återvinningsgraden av sin produktion på grund av högre efterfrågan på indiuminnehållande produkter (Gunn, 2014). Det pågår viss indiumåtervinning från uttjänta produkter. Ett sådant exempel är Xstrata Zink GmbH i Nordenham, Tyskland som behandlar återvunnet material och importerade produkter med elektrolytisk zinkraffinering. Under denna process separeras spårmetaller såsom indium, gallium och germanium och föroreningar från huvudmaterialet och säljs till koppar- och blysmältverk med mindre metallkoncentrat. Mängden återvunna spårmetaller är dock inte offentligt tillgängligt. Andra tyska företag såsom Haines och Maassen och PPM Pure Metals återvinner indiumhaltiga föreningar och erhåller indiummetall med hög renhet (Gunn, 2014).

Den huvudsakliga miljöbegränsningen för indiumåtervinningen är produktionen av stora mängder avloppsvatten i hydrometallurgiska och kemiska processer. Återvinningsprocesserna för indium från LCD-paneler kräver hög tillförsel av kemiska ämnen. Det finns en risk att processvattnet förorenas med giftiga tungmetaller vilket kan påverka följande återvinningsprocesser (Ueberschaar, 2017) eller utgöra ett hot mot miljön. Rening av detta vatten kan naturligtvis genomföras men ökar då på kostnaden och påverkar lönsamheten väsentligt.

4.2 Begränsningar i dagens återvinning

Återvinningsgraden av indium från uttjänta produkter är idag mindre än 1 %. För närvarande finns det inga effektiva och ekonomiskt attraktiva separations- eller raffineringstekniker att återvinna indium från displayenheter. I displayer som har den största andelen av alla applikationer används indium i mycket

små mängder och förekommer i en sandwichblandning, vilket försvårar återvinningen. Massan av indium som finns i LCD-skärmar på olika enheter varierar från 3 ppm i smartphones till 660 ppm i mer traditionella mobiltelefoner (Ueberschaar, 2017). Detta innebär att i många återvinningsprocesser går indium förlorat. I många fall används LCD-paneler som innehåller indium i cementfabriker som energitillförsel från plastdelar eller till kopparsmältverk som energitillförsel och kopparåtervinning. Resten hamnar ofta i deponier som fraktioner från fragmenteringsanläggningar.

Den återvinning av indium som sker är ofta från LCD-paneler separerade från surfplattor och smartphones. Tekniken innebär en sammansatt separation och upplösning av indium-tennoxiden. Mindre mängder hamnar i foliefraktion och lakvattenrester. En åtgärd som kan vidtas är att samla in och lagra dessa skärmar och andra relevanta apparater för återvinning i framtiden när mer effektiva processer utvecklas och högre massflöden av indiuminnehållande enheter är tillgängliga (Buchert et al 2012; Eunomia Research & Consulting Ltd, 2015; Ueberschaar, 2017).

4.3 Exempel inom forskningsfältet

Eftersom den industriella återvinningen av indium är begränsad är forskningen kring återvinning av indium en relativt välrepresenterad sektor med flera nationella och internationella/europeiska projekt varav de flesta har nått en mellan hög mognadsnivå, till exempel TRL 5-7. Den låga mängden indium i elektroniskt avfall och den låga insamlingsgraden internationellt har delvis avskräckt projekt som enbart handlar om återvinning av indium. I stället undersöks metoder där indium återvinns tillsammans med en grupp metaller såsom gallium och sällsynta jordartsmetaller från till exempel solceller vilket bedöms vara mer ekonomiskt genomförbart.

I Sverige har återvinningen av indium bland annat drivits av Chalmers som redan 2010 ledde till framgångsrika projekt såsom HÅLPLA-projektet där indium återvanns från platta skärmar vilket i sin tur ledde till ett FP7-projekt kallat "Utveckling av återvinningsprocesser för återvinning av värdefulla komponenter från FPD (In, Y, Nd) för produktion av högt förädlade NP:er – RECYVAL-NANO". Detta har på senare tid också lett till ett masterprojekt om separation av indium och andra värdefulla metaller från laklösningen genom lösningsmedelsextraktion och spraypyrolysmetoder. Spraypyrolysmetoden användes inte bara för separationsändamål utan också för att producera fina oxidpartiklar. För närvarande drivs ett doktorandprojekt om utvinning av indium och silver från solceller. Vidare pågår arbete inom Mat4Green företaget (<http://www.mat4greentech.com>) för produktion av högren ITO (Indium Ten Oxide). TRL-nivån i Sverige ligger mellan 5-9 (se Mat4Green).

I Europa har återvinningen av indium från olika strömmar (LCD, kretskort, solceller, etc) genomförts i projekt som sträcker sig från de tidiga program till det nuvarande Horizon Europe och samlas på CORDIS-plattformen. Några av projekten har med tiden nått en relativ hög mognadsgrad, TRL 6-7. För

närvarande kan 20 projekt som handlar om återvinning av indium identifieras, se (Cordis, 2021).

5 Molybden

5.1 Användning och återvinning

Molybden används främst som tillsats i stål och förbättrar där styrka, hårdbarhet, svetsbarhet, seghet, hållfasthet vid förhöjd temperatur och korrosionsbeständighet. Unika egenskaper, som gör molybdenmetall och dess legeringar till det valda materialet i en mängd olika tillämpningar både förr och nu. Från slutet av 1930-talet var molybden ett allmänt accepterat tekniskt material speciellt i olika ståltyper för speciella ändamål främst inom krigsindustrin. Slutet av andra världskriget 1945 medförde återigen ökade forskningsinvesteringar för att utveckla nya civila tillämpningar och efterkrigstidens återuppbyggnad av världen gav ytterligare marknader för speciellt hållfasta konstruktionsstål av vilka många redan innehöll en del molybden. Ytterligare tillämpningar relevanta idag inkluderar hög temperaturhållfasthet, termisk och elektrisk ledningsförmåga, kombinerat med låg termisk expansion och miljöstabilitet (Plansee, Rembar, Webelements).

Från den tidiga användningen inom den militära industrin har antalet tillämpningar av molybden ökat väsentligt. Den ökande efterfrågan har balanserats av nya källor men även av nya bearbetningstekniker inklusive storskalig återvinning inom stålindustrin.

Även om stål och gjutjärn utgör det enskilt största marknadssegmentet har molybden också visat sig ovärderlig i diverse superlegeringar, nickelbaserade legeringar, smörjmedel, kemikalier, elektronik och många andra applikationer (Herosscompany, Imoa).

Molybden återvinns i hög grad idag, lite mer än 30 % och det finns tillräckligt många företag som återvinner det. Målet med återvinningen är idag satt till upp emot 80 % och återvinningensmarknaden är växande. Eftersom den dominerande produkten för återvinning är diverse legeringar som finns i stora kvantiteter är den främsta återvinningstekniken pyrokemisk (Moxba, Greystonealloy).

5.2 Begränsningar i dagens återvinning

Det finns idag inga signifikanta tekniska luckor som väsentligt begränsar återvinningen av molybden. Dock kan man notera att ekonomiska incitament för slutanvändare att återlämna eller återta de molybdenhaltiga stålen eller föreningarna delvis saknas. Detta beror troligen på att molybden finns i en uppsjö olika ståltyper och för en effektiv återvinning utan en tydlig nedgradering av materialet borde dessa sorteras före en eventuell återvinning. Detta låter sig dock inte göras smidigt eller lönsamt varför en kontinuerlig nedgradering av de högkvalitativa produkterna sker i återvinningen.

5.3 Exempel inom forskningsfältet

Återvinningen av molybden pågår för närvarande industriellt i Sverige och räknas som specialmetallåtervinning. Denna nationella återvinning är främst inriktad på restproduktionsprodukter och ett projekt som undersöker möjligheten till hydrometallurgisk återvinning av molybden har genomförts vid Chalmers mellan 2017-2018. Syftet med arbetet var att utveckla en hydrometallurgisk process för selektiv återvinning av molybden från stålindustrins stoft.

Det finns även andra återvinningsprojekt fokuserade på pyrokemisk återvinning av specialmetaller där molybden ingår i. Dessa är dock inte specifikt inriktade på molybden, till exempel återvinning av rhenium och tungsten.

TRL-nivån i Sverige ligger mellan 5-9 där TRL 9 avser pyrometallurgiska, redan existerande processer medan TRL 5 avser hydrometallurgiska processer.

Forskning kring återvinningen av molybden har genomförts inom Europa och under Europeiska unionens paraply i projekt som sträcker sig från tidiga ramprogram till det nuvarande och samlas in på CORDIS-plattformen. För närvarande kan 17 projekt som handlar om återvinning av molybden i olika blandning av metaller identifieras, se (Cordis, 2021).

6 Sällsynta jordartsmetaller (REE)

6.1 Användning och återvinning

Vi får börja med att konstatera att återvinningsforskningen kring REE fullständigt exploderade 2008 på grund av kraftigt stigande priser på världsmarknaden som fullständig domineras av en leverantör, Kina. Därför anses det av vikt att utveckla användbara återvinningsprocesser främst i Europa och USA. På grund av den mycket stora volymen av verksamheter på området kan denna sammanställning mest ses som en fingervisning av vad som pågår inom området. Dock kan REE inte uteslutas ur denna rapport då dessa grundämnen anses mycket viktiga i den alltmer dominerande elektronikindustrin.

Termen "sällsynta jordartsmetaller" (REE) syftar på de 15 lantaniderna (atomnummer 57 till 71) plus skandium (21) och yttrium (39). De klassificeras vanligtvis ytterligare i två grupper - lätta (La till Sm) och tunga (Eu till Lu plus Y) på basis av deras kemiska beteende. Vissa av REE är inte sällsynta som sådana utan till och med ganska vanliga eftersom de är mer rikliga i jordskorpan än bly eller koppar. Det är dock mycket sällsynt att hitta ekonomiska fyndigheter av REE på grund av deras olösliga och orörliga beteende samt att de samexisterar i fyndigheterna och att separera dem kemiskt är utmanande och det är därför sällsynt att hitta dem i sin rena form.

Det tog nästan ett sekel från upptäckten av dessa metaller (främst i Skandinavien) innan de fick en kommersiell tillämpning i Österrike av Carl Auer von Welsbach med uppfinningen av gaslampmantlarna. Kommersiell brytning av REE i Sverige och Norge svarade för den tidiga efterfrågan, följt av monazitbrytning i Brasilien, USA och så småningom Indien 1911. Mellan 1965

och 1990 var USA den största globala leverantören av REE och ledande inom REE-kemi. Under den perioden växte den globala produktionen av REE cirka 10 gånger till 70 000 ton 1990. I mitten av 1980-talet började Kina med REE-produktion och steg från att producera 27 % av världens produktion 1990 till ~95 % 2000, med lågt pris för att ersätta all betydande konkurrens.

På grund av deras nukleära, metallurgiska, kemiska, katalytiska, elektriska, magnetiska och optiska egenskaper har REE ett stort antal användningsområden: lättare flintor, glaspolering, fosformaterial i t.ex. lysrör, lasrar, magneter, batterier, magnetisk kylning, högtemperatursupraleddning, säker lagring och transport av vätgas mm.

Många av dessa applikationer kännetecknas av hög specificitet, och de flesta REE har inga substitut som har samma effektiva egenskaper. Ett exempel är europium som används som röd fosfor i färgkatodstrålerör och flytande kristallskärmar. Ingen ersättning är känd och på grund av detta har europium ett relativt högt pris. Samma sak kan sägas om erbium som används i laserrepeater för fiberoptiska kablar som kan överföra signaler över långa avstånd. Specificitet gäller även för de mest förekommande och billigaste REE såsom cerium. Ceriumoxid är det enda välfungerande polermedlet för glasprodukter. Allt från vanliga speglar och glasögon till precisionslinser.

Neodym, samarium, gadolinium och dysprosium revolutionerade permanent magnetteknologin. De möjliggjorde konstruktionen av små, lätta och höghållfasta magneter som har möjliggjort miniatyrisering av många elektriska och elektroniska komponenter. Dessa komponenter används i diverse produkter såsom audio-videoenheter, datorer, bärbara diskenheter, bilar och kommunikationssystem.

På grund av deras relativt låga toxicitet ersätter REM långsamt giftiga metaller som kadmium och bly i laddningsbara batterier. La-Ni-H-batterier ger färre miljöproblem vid kassering eller återvinning, har högre energitäthet och bättre laddnings-URLaddningsegenskaper än många kadmiumbaserade batterier.

I juni 2010 publicerades en EU-rapport med titeln Kritiska råvaror för EU och uppdaterades 2014. Rapporten analyserar ett urval av 41 mineraler och metaller och slutsatsen är att 14 råvaror anses vara kritiska. REE anses där tillsammans med platinagruppermetallerna (PGM) vara de mest kritiska.

När det gäller återvinningen får den nog anses vara obefintlig. Mindre än 5% av REE återvinns idag. På grund av den stora variationen i produkter som innehåller REE och deras kemiska egenskaper är det inte ovanligt att pyrokemiska metoder används på materialen i stort och REE förloras då ofta i slaggsfasen. Försök att använda slaggar i efterföljande hydrokemisk återvinning finns men har inte tillämpats framgångsrikt i större skala. Högre REE har delvis producerats från återvunnet material i mindre skala genom kromatografiska metoder.

6.2 Begränsningar i dagens återvinning

Det finns idag en uppsjö hinder som begränsar återvinningen av REE på den breda globala marknaden. Detta gäller både utveckling av effektiva kemiska processer men också insamling av relevanta materialströmmar som är enhetliga nog för att en mer specifik återvinning skall kunna genomföras. Det största problemet anses nog dock flyktigheten hos prisbildningen. Eftersom världsmarknaden domineras av en aktör fluktuerar priserna kraftigt varför en mer långsiktig insats för processutveckling ter sig osäker.

6.3 Exempel inom forskningsfältet

Återvinningsforskningen rörande REE på grundnivå är en mycket välrepresenterad sektor med många nationella och internationella/europeiska projekt. Några av dem har nått relativt långt, TRL 6-7 men har inte i någon egentlig mening tagits upp av återvinningsindustrin av anledningar som givits ovan.

I Sverige har återvinningsforskningen av REE varit betydande på Chalmers, KTH och Uppsala universitet med deltagande i flera internationella och nationella projekt. Man kan i sammanhanget bara nämna några dylika projekt såsom: återvinning av REE från olika källor, som ljusapparater (t.ex. FP7 Re-light Project, FP7 Reclaim Project), permanenta magneter (t.ex. FP7 EREAN, FP7 REMANENCE, FP7 Recyval-Nano och andra), utvinning av REE från sekundära källor som röd lera eller gruvavfall (t.ex. REDMUD och Era-MIN ENVIREE). I Sverige finns även det industriellt drivna ReeMAP som i sig inte direkt utvinnet REE men som utnyttjar gruvavfall för att utvinna ett pyritkoncentrat som sedan förädlas till svavelsyra som i sin tur skall användas för lakning av REE från LKABs tidigare gruvavfall.

Kartläggning av befintliga resurser i Europa samt efterfrågan på REE på europeisk nivå tillsammans med ett försök att utveckla en hållbar REE-extraktions- och raffineringsteknik, för att producera rena REE-oxider, REE-metaller och REE-legeringar lämpliga för användning i nedströmsindustrier (FP7 EURARE-projektet), utveckling av återvinningsprocesser för återvinning av värdefulla komponenter från FPD (In, Y, Nd) för produktion av högt förädlade NP (RECYVAL-NANO), följt av Scale-up of Recycling av REE från fluorescerande pulver finansierat av VINNOVA följt av ett annat europeiskt projekt EREAN – European Rare Earth Magnet Recycling Network där REEs återvanns från permanentmagneter. Vidare involverade ett annat projekt nästan alla aktörer i Europa, SCRREEN – Solutions for Critical Raw Materials – ett europeiskt expertnätverk, där svenska universitet och återvinningsindustrier var representerade.

I databasen CORDIS kan man idag finna över 83 projekt som handlar om återvinning av REE. Siffran är här mycket osäker då vissa projekt hanterar olika REE vilket innebär att en rimlig gissning landar på drygt det dubbla totalt sett.

7 Begränsningar och möjligheter för återvinning

Det är tämligen tydligt från beskrivningarna i denna rapport att det finns tekniker på olika nivåer för att öka återvinningen av många innovationskritiska metaller drastiskt. Man kan då fråga sig varför det inte görs i den utsträckning som vore lämpligt. Orsakerna ligger i både materialen och dess utveckling men även i betydligt mindre tekniska områden.

För att börja med de tekniska kan man konstatera att allteftersom vissa metaller blir dyrare minskar tillverkarna dess innehåll i de producerade produkterna samtidigt som specialiseringen ökar vilket medför en större inblandning av fler metaller med speciella egenskaper. Dessa faktorer tillsammans gör att det är mycket svårt att bygga upp en robust, lönsam och stabil industri kring återvinning då man skjuter på ett mål som inte bara rör sig utan som ser olika ut allteftersom tiden går. Alltså måste återvinningsprocesserna designas för att vara mycket flexibla. Kopplat till detta är behovet av bra logistikkedjor för avfall för att säkerställa den mängd material som kan vara nödvändig för att en industriell process skall vara lönsam.

Flexibla processer betyder flexibla tillstånd att driva dem. Idag är handläggningstiden för industriella tillstånd mycket lång så att även för mer traditionell återvinning kan det vara ett stort hinder när en process behöver förändras. Då skall nya tillstånd sökas med helt nya regelverk än vad som gällde när den ursprungliga processen togs fram. Dessutom hanterar man ett material som var godkänt på marknaden när det introducerades men idag kanske det anses hålla för hög halt av något ingående ämne. Detta betyder att det är inte bara återvinning som skall göras utan i princip nytillverkning av virgint material. Det är naturligtvis möjligt att bygga återvinningsprocesser som återvinner ned till isolerade grundämnen i många fall men för bulkåtervinning som t. ex. stål av olika kvaliteter blir det oerhört kostsamt.

Till detta kommer diskussionerna kring ”down recycling” visavi ”up recycling”. Det bör lämpligen löna sig att återvinna till ett bättre eller lika bra material som det man startar med avseende på renheter etc. Tyvärr blir ofta ”rent nog” ett idiom vilket resulterar i svårare och svårare avfallsströmmar. För att underlätta detta kan även transportregler behöva ses över. Avfallet kan behöva samlas in och sedan transporteras till en lämplig anläggning för att optimera återvinningen.

Det diskuteras ofta i termer av ”giftfritt” när det gäller återvinning och dess processer. En mer relevant inkörsport skulle kunna vara ”riskfritt”. I det senare fallet behöver man då föra en vetenskaplig diskussion om t.ex. lakbarhet, kemiska former och andra faktorer som spelar roll för den risk som kan associeras med ett material.

Andra begränsningar är av mer långsiktig art. Inom t.ex. gruvindustrin har det länge varit möjligt att lagra material som vid brytningen ej varit lönsam att bearbeta vidare. Inom återvinningen tillämpas en deponiskatt i detta fall. Rent tekniskt kan detta gälla t. ex. bottenaska vid förbränning av avfall. Detta material kan ofta på grund av sitt höga metallinnehåll ej användas som

konstruktionsmaterial (även om ett kopparinnehåll på 1000- 5000 ppm godkänns vilket är snarlikt med vissa gruvor idag) men med dagens teknik inte heller direkt utvinns effektivt. Kunde man lagra detta malda material för framtiden, även återta annat material från deponier, och på så sätt totalt öka återvinningen när det är lönsamt torde detta vara ett steg framåt.

Sålunda kan vi dra slutsatsen att för att öka återvinningen industriellt i Sverige behövs en översyn av de regelverk som styr återvinningsverksamheten.

Det saknas i Sverige en sökbar databas för relevanta projekt som har beviljats medel. Detta finns på EU-nivå genom CORDIS där man kan söka på t.ex. ”indium recycling” och man får då en lista projekt med dessa nyckelord samt länkar till relevanta rapporter och annan information. Det torde inte vara ogörligt att liknande byggs baserat på stora finansiärer i Sverige såsom till exempel, VR, FORMAS, VINNOVA och andra. I en sådan databas skulle sedan andra relevanta aktörer kunna lägga in sina projekt. En dylik databas skulle göra det enkelt att hitta var kunskapsläget ligger rörande en viss metall eller avfallsström och på så sätt fokusera forskningen, forskningsfinansieringen och utvecklingen där den gör bäst nytta.

När det gäller mer direkt kunskapsöverföring och kraftfulla satsningar på specifika problem är nationella kompetenscentrum inom återvinning en möjlighet. Det finns i dag organisationer som t.ex. Avfall Sverige och Elkretsen med specifika ansvarsområden men helheten kring återvinningen är mer otydlig. En central, nationell satsning på detta i form av t. ex. ett kompetenscentrum skulle sannolikt öka samarbetet både akademisk och industriellt såsom man sett inom skogs- och metallindustrin och deras centra. Återvinningsfrågor spänner över en stor bredd av kompetenser vilket i så fall bör vara representerat.

Referenser

Albler, F. J., Bica, K., Foreman, M. R. S. J., Holgersson, S., & Tyumentsev, M. S. (2018). A comparison of two methods of recovering cobalt from a deep eutectic solvent: Implications for battery recycling. *Journal of Cleaner Production*, 167, 806–814. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.135>

Albemarle, “Albemarle Investor Presentation,” 2019.

Azevedo, M., Campagnol, M., Hagenbuch, T., Hoffman, K., Lala, A., Ramsbottom, O., “Lithium and Cobalt: A Tale of Two Commodities,” McKinsey & Company, 2018.

Balachandran, S.; Forsberg, K.; Lemaitre, T.; Vieceli, N.; Lombardo, G.; Petranikova, M. Comparative Study for Selective Lithium Recovery via Chemical Transformations during Incineration and Dynamic Pyrolysis of EV Li-Ion Batteries. *Metals* 11, 1240, 2021, <https://doi.org/10.3390/met11081240>

“Battery University: Understanding Lithium-ion,” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion.

Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., & Pingel, D. (2012). Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Freiburg: Öko-Institut, Retrieved from [http://www.resourcefever.org/publications/reports/Recycling critical raw materials from waste electronic equipment.pdf](http://www.resourcefever.org/publications/reports/Recycling_critical_raw_materials_from_waste_electronic_equipment.pdf)

Campbell, C. F. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering alloys*, 345–347.

Delorme, F., Chen, C., Pignon, B., Schoenstein, F., Perriere, L., & Giovannelli, F. (2017). Promising high temperature thermoelectric properties of dense Ba₂Co₉O₁₄ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(7), 2615–2620. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.01.034>

CORDIS database: <https://cordis.europa.eu/>

Eunomia Research & Consulting Ltd. (2015). Study on the Competitiveness of the EU Primary and Secondary Mineral Raw Materials Sectors. Retrieved from <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d066d034-e0f0-4c6a-9437-59b01dfc0070>

European Commission. (2017, updated from 2014). Study on the review of the list of critical raw materials. Critical Raw Materials Factsheets. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2873/398823>

Ferron, C. J. (2016). The recycling of cobalt from alloy scrap, spent batteries or catalysts and metallurgical residues - an overview. *Ni-Co* 2013, (3), 53–71. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48147-0_3

Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., & Rutz, M. (2012). Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 207, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.152>

Gunn, G. (2014). *Critical metals handbook*. American Geophysical Union
Hamut, H. S. (2017). 2 Electric Vehicle Battery Technologies 2.1 Introduction, 49–92.

Häläinen, M., & Isomäki, I. (2005). Thermodynamic evaluation of the C-Co-Zn system. *Journal of Alloys and Compounds*, 392(1–2), 220–224.

https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/affu/dokument/energimyndigheten_den-nordiska-batteriervardekedjan_del-1_final-rapport_2021-02-24.pdf

<http://www.hcrosscompany.com/refractory/molybdenum.htm>

http://www.imoa.info/molybdenum/molybdenum_history.html

<http://www.plansee.com/molybdenum-and-its-alloys-mo.htm>

<http://www.webelements.com/molybdenum/>

<https://moxba.com/molybdenum-recycling/>

<https://www.greystonealloys.com/metals/molybdenum-scrap/>

Jacoby, M., “It’s time to get serious about recycling lithium-ion batteries,” *Chemical and Engineering News*, vol. 97, no. 28, 2019.

K.B. Shedd, *Cobalt recycling in the United States in 1998*. U . S . Department of the Interior, U . S . Geological Survey, Open File Report 02-299. Reston, VA, USA, 1998. (1998).

Katiyar, P. K., Randhawa, N. S., Hait, J., Jana, R. K., & Singh, K. K. (2014). An overview on different processes for recovery of valuable metals from tungsten carbide scrap ., 1–11.

Kim, S., Seo, B., & Son, S. H. (2014). Dissolution behavior of cobalt from WC-Co hard metal scraps by oxidation and wet milling process. *Hydrometallurgy*, 143, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.01.004>

- Kücher, G., Luidold, S., Czettel, C., & Storf, C. (2018). Lixiviation kinetics of cobalt from cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 70(October 2017), 239–245.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.10.004>
- Lee, J. C., Kim, E. Y., Kim, J. H., Kim, W., Kim, B. S., & Pandey, B. D. (2011). Recycling of WC-Co hardmetal sludge by a new hydrometallurgical route. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29(3), 365–371.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.01.003>
- Lee, J., Kim, S., & Kim, B. (2017). A New Recycling Process for Tungsten Carbide Soft Scrap That Employs a Mechanochemical Reaction with Sodium Hydroxide. *Metals*, 7(7), 230.
<https://doi.org/10.3390/met7070230>
- Llusar, M., Forés, A., Badenes, J. A., Calbo, J., Tena, M. A., & Monrós, G. (2001). Colour analysis of some cobalt-based blue pigments. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(8), 1121–1130.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00295-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00295-8)
- Mathieux, F., Ardente, F., Bobba, S., Nuss, P., Blengini, G., Alves Dias, P., ... Solar, S. (2017). Critical raw materials and the circular economy - Background report.
<https://doi.org/10.2760/378123>
- Melin, H.E, State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – A research review, 2019,
<https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf>
- Meng, Q., Zhang, Y., & Dong, P. (2017). Use of glucose as reductant to recover Co from spent lithium ions batteries. *Waste Management*, 64, 214–218.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.017>
- Meng, Q., Zhang, Y., & Dong, P. (2018). A combined process for cobalt recovering and cathode material regeneration from spent LiCoO₂batteries: Process optimization and kinetics aspects. *Waste Management*, 71, 372–380.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.030>
- Ogura, K., & Kolhe, M. L. (2017). Battery technologies for electric vehicles. *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, 139–167.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5>

Pavel, C., Marmier, C., Alves, A., Schüler, P., Schleicher, D., Degreif, T., Öko-institut, V. (2016). Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles.
<https://doi.org/10.2790/64863>

Pegoretti, V. C. B., Dixini, P. V. M., Smecellato, P. C., Biaggio, S. R., & Freitas, M. B. J. G. (2017). Thermal synthesis, characterization and electrochemical study of high-temperature (HT) LiCoO₂ obtained from Co(OH)₂ recycled of spent lithium ion batteries. *Materials Research Bulletin*, 86, 5–9.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.09.032>

Peng, C., Hamuyuni, J., Wilson, B. P., & Lundström, M. (2018). Selective reductive leaching of cobalt and lithium from industrially crushed waste Li-ion batteries in sulfuric acid system. *Waste Management*.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.052>

Rodrigues, L. E. O. C., & Mansur, M. B. (2010). Hydrometallurgical separation of rare earth elements, cobalt and nickel from spent nickel-metal-hydride batteries. *Journal of Power Sources*, 195(11), 3735–3741.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.071>

Sita, L. E., da Silva, S. P., da Silva, P. R. C., & Scarminio, J. (2017). Re-synthesis of LiCoO₂ extracted from spent Li-ion batteries with low and high state of health. *Materials Chemistry and Physics*, 194, 97–104.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.03.026>

Roskill Research, “Lithium, Outlook to 2030,” [Online]. Available:
<https://roskill.com/market-report/lithium/>. [Accessed 28 11 2020].

Srivastava, R. R., Kim, M. S., Lee, J. C., Jha, M. K., & Kim, B. S. (2014). Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*, 49(14), 4671–4686.
<https://doi.org/10.1007/s10853-014-8219-y>

Tagray, “Lithium Carbonate Powder for Battery Manufacturing,” [Online]. Available:
<https://www.tagray.com/li-ion-battery/battery-grade-lithium/lithium-carbonate.2020>.

Takacova, Z., Havlik, T., Kukurugya, F., & Orac, D. (2016). Cobalt and lithium recovery from active mass of spent Li-ion batteries: Theoretical and experimental approach. *Hydrometallurgy*, 163, 9–17.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.03.007>

Torkaman, R., Asadollahzadeh, M., Torab-Mostaedi, M., & Ghanadi Maragheh, M. (2017). Recovery of cobalt from spent lithium ion batteries by using

acidic and basic extractants in solvent extraction process. *Separation and Purification Technology*, 186, 318–325.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.023>

Ueberschaar, M. (2017). Assessing recycling strategies for critical raw materials in waste electrical and electronic equipment. Technische Universität Berlin, Berlin

Wang, H., Huang, K., Zhang, Y., Chen, X., Jin, W., Zheng, S., ... Li, P. (2017). Recovery of Lithium, Nickel, and Cobalt from Spent Lithium-Ion Battery Powders by Selective Ammonia Leaching and an Adsorption Separation System. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(12), 11489–11495.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02700>

Willuhn, M., “Zero-waste batteries,” *PV Magazine*, 2020.

Xi, X., Xiao, X., Nie, Z., Zhang, L., & Ma, L. (2017). Electrolytic separation of cobalt and tungsten from cemented carbide scrap and the electrochemical behavior of metal ions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 794(April), 254–263.

<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.04.001>

BILAGA 3

Barriärer och styrmedel för återvinning av innovationskritiska metaller: lärdomar från forskningslitteraturen

Rapport på uppdrag av Riksdagsförvaltningen
December 2021

Patrik Söderholm

Luleå tekniska universitet (LTU)
Nationalekonomiska enheten
971 87 Luleå
E-post: patrik.soderholm@ltu.se

1. Introduktion

Under sommaren 2021 beslutade näringsutskottet i Sveriges riksdag att ge mandat för utskottets grupp för uppföljning och utvärdering att fatta beslut om att ta fram en forskningsöversikt om innovationskritiska metaller och mineraler. Föreliggande rapport utgör en del av denna översikt, och fokuserar på barriärer och styrmedel för ökad återvinning av innovationskritiska metaller.

1.1 Bakgrund

Scenarier över den framtida användningen av metaller och mineral visar på en ökad efterfrågan på global nivå; detta gäller både för de traditionella bulkmetallerna såsom koppar, aluminium och stål men inte minst för de så kallade innovationskritiska metallerna. I denna grupp ingår exempelvis litium, kobolt, grafit, vanadin, rhenium, platinagruppens metaller (bl a platina och palladium), samt en rad olika så kallade sällsynta jordartsmetaller.

Det ”innovativa” kopplat till dessa metaller handlar om att efterfrågan i stor utsträckning kan relateras till den omfattande tillväxten i informations- och kommunikationsteknologin samt till klimatomställningen. Det senare syftar t.ex på utbyggnaden av vindkraft och solenergi samt den pågående elektrifieringen av industri- och transportsektorerna. Det globala behovet av kobolt och litium härrör från tillverkningen av (litium-jon) batterier, medan sällsynta jordartsmetaller (t ex dysprosium och neodym) används i magneter, elmotorer, legeringar och kretskort. Det ”kritiska” med de innovationskritiska metallerna handlar om att dagens tillgänglighet på dessa är förhållandevis låg i förhållande till det växande behovet. Detta knyter även an till tillgången på substitutmaterial samt konsekvenserna för samhället som helhet utifall det uppstår en brist. Produktionen av de innovationskritiska metallerna är ofta starkt koncentrerad till vissa länder och regioner, bland annat Kina som står för en hög andel (cirka 65 procent) av världens primära produktion av sällsynta jordartsmetaller.

En viktig strategi för att säkerställa den framtida tillgången på innovationskritiska metaller är att främja ökad återvinning av dessa metaller. Den svenska handlingsplanen för en cirkulär ekonomi lyfter fram återvinning av innovationskritiska metaller och mineral som en prioriterad värdekedja i omställningen till en cirkulär ekonomi. Överlag är dagens återvinningsgrader för innovationskritiska metaller mycket låga; utav den globala produktionen av vissa sällsynta jordartsmetaller står sekundär produktion exempelvis endast för 3–8 procent. Motsvarande återvinningsgrader för koppar, aluminium och stål är betydligt högre, och för dessa metaller har förhållandevis effektiva skrotmarknader växt fram över tid. Det material som handlas på dessa marknader är i huvudsak stora volymer av lättillgängligt skrot (ibland direkt från industrin). Den tydliga trenden är dock att metallanvändningen i samhället blir alltmer komplex, och det påverkar förutsättningarna för ökad återvinning, inte minst av innovationskritiska metaller. Idag nyttjas ofta ett stort antal metaller

i en och samma produkt (om än i små mängder), detta i form av olika legeringar men även andra kombinationer av material.

I denna rapport syntetiseras tidigare forskning som på olika sätt berör barriärer för återvinning av metaller och mineral, samt vilken roll politiska styrmedel kan spela för att överkomma dessa barriärer. Fokus är på de innovationskritiska metallerna, och den komplexitet som kännetecknar användningen av dessa metaller idag. Förutsättningarna för ökad metallåtervinning skiljer sig ofta åt beroende på såväl material men inte minst på i vilka produkter dessa material finns.

1.2 Syfte och avgränsningar

Syftet med rapporten är att – med utgångspunkt i tidigare forskning – identifiera och diskutera olika typer av barriärer för ökad återvinning av innovationskritiska metaller, samt redogöra för några viktiga lärdomar för utformningen av politiska styrmedel som kan främja återvinningen.

Den forskning som är direkt relevant för syftet med denna rapport är relativt begränsad, bland annat eftersom det finns få empiriska erfarenheter av styrmedel som är utformade för att främja återvinningen av specifikt innovationskritiska metaller. Av denna anledning är det meningsfullt att konsultera den teoretiska (konceptuella) forskningen om incitament för materialåtervinning under olika styrmedel och institutionella förutsättningar. Det finns även intressant forskning om hur de existerande marknaderna för olika bulkmetaller växt fram över tid, och sådana studier resulterar ofta i viktiga generella lärdomar också för innovationskritiska metaller. Givet syftet med rapporten har det också varit viktigt att konsultera mer teknisk forskning (t ex inom geologi och industriell ekologi); den kastar ofta ljus på viktiga barriärer för metallåtervinning genom att öka förståelsen för de relevanta värdekedjorna samt för hur många metaller tenderar att vara inbäddade/integrerade i flera olika produkter. Sådan forskning är även central för att identifiera områden där det ny teknologi som kan effektivisera återvinningsprocessen behöver utvecklas (t ex processer för demontering). I denna rapport diskuteras därför även styrmedel vars syfte är att främja sådan teknologisk utveckling.¹

En viktig avgränsning är att rapporten inte innehåller en fördjupad analys av specifika styrmedel som skulle kunna implementeras för att främja en ökad återvinning av de innovationskritiska metallerna. Styrmedelsval är komplexa, inte minst på detta område där förutsättningarna för metallåtervinning ofta är starkt kontextspecifika och således beroende av i vilka produkter och artefakter som metallen finns.² Emellanåt kommenteras olika styrmedel och

¹ Rapporten har som ambition att på ett populärvetenskapligt sätt syntetisera viktiga lärdomar från forskningen, men innehåller (enligt överenskommelse med uppdragsgivaren) inga utförliga referenser till all relevant litteratur. I stället avslutas rapporten med en lista på litteratur, som kan konsulteras för fördjupade studier.

² Ett viktigt angreppssätt för att öka förståelsen för de olika kontexter som styrmedel kan verka i är att undersöka effekterna av existerande styrmedel (t ex i olika länder). Det finns

policyförslag i syfte att illustrera och exemplifiera viktiga poänger, och i rapporten diskuteras ett antal viktiga vägval och generella lärdomar för politikens utformning.

Innovationskritiska metaller kan återvinnas från flertalet källor: produkter, infrastruktur, gruvavfall, samt industrideponier. De exempel som illustreras i rapporten härrör framförallt från återvinning från uttjänta fordon, bygg- och rivningsavfall, elektronik och elektriska produkter, samt en del andra konsumentprodukter. Många av de lärdomar från forskningen som belyses i rapporten är dock så pass generiska att de även är tillämpbara på återvinning från andra källor.

1.3 Angreppssätt

Som antyds ovan finns en förhållandevis rik forskningslitteratur som kartlägger och diskuterar olika barriärer för metallåtervinning. Dessa studier kategoriserar ofta dessa barriärer på olika sätt, och ibland med en avsaknad av en tydlig systematik. Den syntes av forskningen som återfinns i denna rapport bygger på ett samhällsekonomiskt angreppssätt där de ekonomiska marknaderna för metallskrot utgör viktiga ”verktyg” för att åstadkomma en effektiv resursfördelning. På dessa marknader möts köpare och säljare av metaller, och dessa aktörers decentraliserade beslut leder till ett stort antal ömsesidigt fördelaktiga byten. De flesta marknader fungerar dock inte fullt ut effektivt i meningen att det som är rationellt utifrån de enskilda aktörernas horisont inte sammanfaller med det som är önskvärt för samhället som helhet (dvs för alla medborgares välfärd). Detta innebär att det är meningsfullt att analysera metallåtervinningens barriärer med utgångspunkt i förekomsten av brist på – eller t o m avsaknad av – *incitament* för industrin att handla med återvunnen metall på marknaderna. En central uppgift för politiken är därför att adressera sådana marknadsmisslyckanden, och införa styrmedel som stärker dessa incitament.

I forskningen om metallåtervinningens framtida förutsättningar hänvisas ofta till olika *tekniska* barriärer, dvs att det exempelvis saknas teknologier och processer för effektiv demontering av olika produkter. Detta är en viktig observation, och i linje med vårt fokus på incitamentsbrister innehåller rapporten en diskussion om faktorer som tenderar att försvaga industrins incitament att investera i ny kunskap kopplat till ökad metallåtervinning, t ex via tillämpad FoU samt olika pilot- och demonstrationsprojekt. Vi syntetiserar också lärdomar från tidigare forskning rörande vilka typer av styrmedel och styrmedelskombinationer som kan behövas för att främja sådan teknologisk utveckling. I detta sammanhang är det viktigt att påpeka att denna utveckling inte bara handlar om teknik utan likväl om etablering av nya aktörsnätverk och värdekedjor;

dock en avsaknad av sådan forskning kopplat till innovationskritiska metaller eftersom återvinningsgraderna för dessa metaller fortfarande är mycket låga, och få styrmedel riktas direkt mot dessa metaller.

ibland är politikens roll inte bara att effektivisera (korrigera) existerande marknader utan även att bidra till att skapa nya.

Inga ekonomiska marknader verkar dessutom i ett vakuum; de är inbäddade i en lång rad olika institutioner i form av lagstiftning men även normer och praxis i olika former (t ex kopplat till företagskulturer). I de flesta samhällen finns ett visst mått av institutionell tröghet där t ex den existerande lagstiftningen ibland kan ha utvecklats i syfte att adressera den dominerande industrin, t ex den primära (malmbaserade) produktionen av metall och mineral snarare än den mer omogna sekundära produktionen (som är baserad på återvunnen metall). Forskningen om relevanta institutionella barriärer för metallåtervinning är mycket begränsad, inte minst sådan forskning som explicit rör olika innovationskritiska metaller, och den som finns kan ofta vara nationsspecifik (t ex forskning om Kinas lagstiftning). I rapporten ger vi dock några exempel på institutionella utmaningar med fokus på EU samt den nationella nivån.

1.4 Disposition

Kapitel 2 innehåller en kort introduktion till existerande marknader för återvunnen metall, med fokus på ett antal generella egenskaper på efterfråge- och utbudssidan samt hur dessa i sin tur påverkar prisbildningen på metallskrot samt konkurrensen mellan den primära och sekundära produktionen. I kapitel 3 introduceras och exemplifieras olika typer av marknadsmisslyckanden och institutionella barriärer som tenderar att hämma etableringen av effektiva marknader för de innovationskritiska metallerna, samt även den teknologiska utvecklingen på dessa marknader. Kapitel 4 presenterar fem övergripande lärdomar för utformningen av en politik som syftar till att stödja en ökad återvinning av metaller, inte minst de innovationskritiska. Rapporten avslutas med några korta reflektioner om det fortsatta lärandet i kapitel 5, samt en lista innehållande ett antal relevanta forskningsstudier och rapporter.

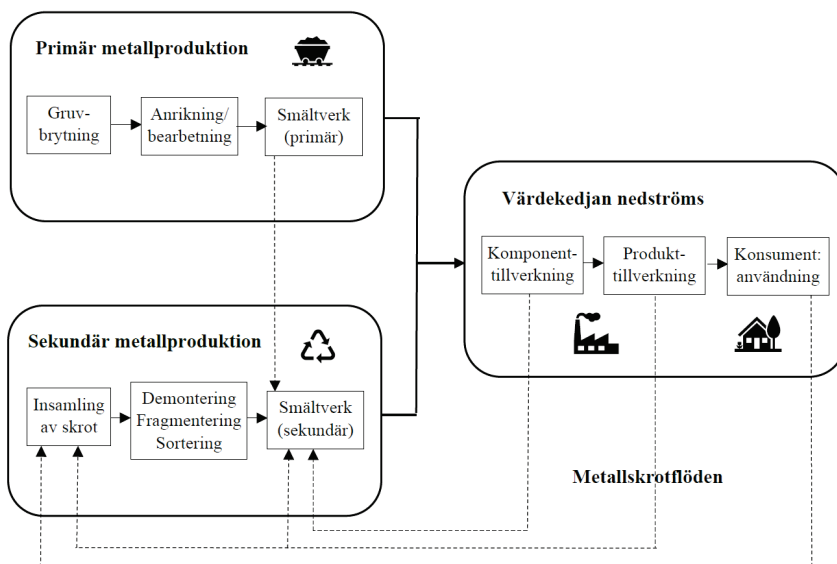
2. Marknaderna för återvunna metaller: några viktiga egenskaper

2.1 Introduktion

I detta kapitel redogör vi för några generella egenskaper hos existerande ekonomiska marknader för återvunna metaller. En förståelse för dessa egenskaper är ett viktigt första steg för att kunna bedöma effekterna av – och motiven till – olika politiska styrmedel som syftar till att öka metallåtervinningen. Kapitlet beskriver kort de olika faktorer som påverkar efterfrågan och utbud för återvunna metaller, samt hur dessa i sin tur påverkar prisbildningen på återvunnen metall. Vi belyser även viktiga konsekvenser för konkurrensen mellan den primära metallproduktion som baseras på jungfruliga (malmbaserade) råvaror och den sekundära som baseras på återvunnen metall.

Figur 1 illustrerar flödet av material kopplat till den primära och den sekundära produktionen av metaller; denna illustration är en viktig utgångspunkt för den beskrivning av marknadernas funktionssätt som finns i detta kapitel samt den analys av omständigheter som kan göra att dessa marknader fungerar ineffektivt (s k marknadsmislyckanden) i nästa kapitel. Primär produktion resulterar i metaller, som förädlas till nya produkter, byggnadskonstruktioner och infrastruktur. En betydande del av det metallskrot som genereras längs värdekedjorna kommer direkt från de olika tillverkningsstegen (s k internt skrot och nytt skrot). Dessa flöden är förhållandevis slutna med höga återvinningsgrader av skrot (som ofta är fritt från legeringar och spårelement). Fokus i denna rapport är i första hand på det metallskrot som under olika lång tid lagras i samhället, och blir tillgängligt för återvinning först när de olika konstruktionerna och produkterna nått sin slutliga livslängd (s k gammalt skrot).

Figur 1: Primära och sekundära värdekedjor för metall och mineral



Återvinningsprocesserna för olika skrottyper skiljer sig åt men består typiskt sett av insamling, demontering, fragmentering, sortering och smältning. Ett viktigt budskap från denna rapport är att de faktorer som förhindrar framväxten av mer effektiva metallåtervinningsmarknader härrör från mer eller mindre alla delar av de värdekedjor som illustreras i Figur 1. Detta knyter an till de incitament som möter säljare och köpare av återvunnen metall men likväl till de beslut som bl a produkttillverkare tar rörande produkternas innehåll och utformning.

Figur 1.1 bortser från mycket av den komplexitet som kännetecknar marknaderna för återvunna metaller, inte minst de innovationskritiska. Dessa marknadernas funktionssätt avgörs i hög grad av vilka produkter som återvinns. Detta

är speciellt tydligt i demonteringsfasen där olika företag ofta specialiserar på utvalda produkter, t ex hemelektronik, fordon. Beroende på produkternas komplexitet samt vilka metaller som återvinns kommer även behovet av sortering, demontering och fragmentering samt olika processmetallurgiska processsteg att vara olika stort. Detta innebär i sin tur att de marknadsmisslyckanden som påverkar förutsättningarna för en ekonomiskt effektiv återvinning också kan skilja sig åt, t ex kopplat till var i processen de uppkommer samt hur omfattande marknadsmisslyckandena är. Denna komplexitet återkommer vi till i kapitel 3. Resterande delar av detta kapitel fokuserar på några generiska egenskaper hos marknaderna för återvunna metaller, och kapitlet avslutas med en diskussion om hur dessa egenskaper påverkar konkurrensen mellan primär och sekundär metallproduktion.

2.2 Efterfrågan på metaller

Efterfrågan på metaller är en *härledd* efterfrågan i meningen att hushållens efterfrågan på dessa är en följd av deras behov av olika produkter, t ex bilar, hemelektronik, och hushållsmaskiner. De företag som tillverkar dessa produkter behöver i sin tur använda metaller i sin produktion för att kunna erbjuda produkter – och även infrastruktur – som uppfyller medborgarnas behov, t ex en trafiksäker bil, en mobiltelefon med många olika funktioner, en hållfast bro. Metaller har med andra ord viktiga attribut och kvaliteter – t ex styrka, uthållighet, förmåga att motstå korrosion – som i olika sammanhang är centrala för produkters funktionalitet och därmed deras ekonomiska värde.

Forskningen har visat att efterfrågan på metaller är starkt kopplad till inkomstnivån i samhället, och således högre (per capita) i rika länder jämfört med fattiga. Det kan exempelvis noteras att EU idag står för cirka en tredjedel av världens användning av metaller, men regionens andel av världsbefolkningen är endast cirka 6 procent. Metaller används dessutom i hög grad i sektorer som är konjunkturberoende, t ex biltillverkning, byggande. Under perioder av högkonjunktur och stark ekonomisk tillväxt får vi därför ofta en omfattande efterfrågeökning på metaller. Ett exempel på detta är den kraftiga metallintensiva ekonomiska tillväxten i Kina sedan 2000.

Efterfrågan på metaller tenderar dock överlag att vara relativt okänslig för prisförändringar. Det kan kopplas till att metallerna i en produkt oftast står för en liten andel av produktens värde på marknaden. Även om priset på en metall stiger mycket kan effekten på tillverkningskostnaden samt konsumentpriset bli liten. Den låga nivån på metallefterfrågans priskänslighet kan också kopplas till kapitalintensiteten i de industrianläggningar som bearbetar mineral och metall, dvs. stålverk, smältverk, gjuterier, etc. Produktionen i dessa baseras på storskaliga processer i vilka behovet av metaller och mineral för att producera en enhet av produkten, i termer av volymer och kvalitet, är mer eller mindre givet. Dessa processer sätter även gränser för vilka andelar av primärt samt sekundärt material som kan användas. Det är i regel endast genom

investeringar i nya anläggningar som en mer omfattande substitution mellan jungfrulig och återvunnen metall kan ske.

Såsom påpekades ovan blir metallanvändningen i samhället mer komplex. För att åstadkomma olika egenskaper i produkter kan metaller förekomma i ren form, i legeringar samt som kemiska föreningar, och ibland behövs även mer komplexa materialstrukturer, t ex där metallegeringar kombineras med keramik och fiber. Ett relevant exempel är bilar där mer och mer elektronik har introducerats över tid. Denna trend förstärks i och med introduktionen av elbilar där kobolt och litium behövs i batterierna. Även olika sällsynta jordartsmetaller är viktiga komponenter i elbilar, t ex i batteriet (lantano, cerium), motorn (neodym, praseodym, dysprosium, terbium), i LCD skärmar (yttrium, cerium, europium), och katalysatorn (cerium, lantano). En utmaning för metallåtervinningssektorn är även att tillverkningen av vissa produkter är beroende av metaller i ren form för att åstadkomma de rätta egenskaperna (t ex hållbarhet eller låg vikt). Detta gör det svårt att återvinna metallerna för användning i samma produktionsprocess; det är med andra ord inte säkert att all den metall som återvinns från uttjänta fordon – given dagens teknologi – kan användas i produktionen av nya fordon.

2.3 Utbudet av metaller

2.3.1 Primär produktion

Primär produktion av metaller och mineral sker i gruvor (dagbrott och underjordsgruvor), och dessa mineral bearbetas därefter, ibland i flera steg (t ex smältverk, anrikningsverk, pelletsverk, masugnar). En viktig egenskap rörande utbudet av metall – inte minst de innovationskritiska – är att en och samma gruvverksamhet ofta leder till produktion av flera metaller. Därför är det nödvändigt att göra en distinktion mellan huvudprodukter och biprodukter. En huvudprodukt är en produkt som är så pass viktig att den ensam påverkar produktionsbesluten i verksamheten; biprodukter produceras vid sidan om en huvudprodukt, och dess pris påverkar inte produktionen av huvudprodukten. En viktig konsekvens av detta är att utbudet av biprodukter begränsas av produktionsnivån för huvudprodukten, och blir därmed beroende av prisutvecklingen på huvudprodukten.³ Detta för också med sig att även om priset på metaller som utgör biprodukter ökar påverkas inte produktionen av dessa.

En för denna rapport syften viktig observation är att många innovationskritiska metaller utgör idag biprodukter till andra metaller, ofta bulkmetaller. Detta gäller exempelvis flertalet metaller som ingår i elektroniska produkter och i solenergiteknologi (t ex gallium, germanium, indium), och ett antal sällsynta jordartsmetaller som är centrala i produktionen av havsbaserad vindkraft

³ I LKAB:s fall utgör järnmalmen huvudprodukten i gruvverksamheten. Företagets pågående utvecklingsarbete (ReeMAP) går ut på att utvinna nya produkter, t ex olika sällsynta jordartsmetaller, från avfallet. Dessa kommer att utgöra biprodukter. Detta innebär med andra ord att det framtida utbudet av sällsynta jordartsmetaller från LKAB:s verksamhet kommer att vara direkt beroende av företagets försäljning av järnmalmsbaserade produkter (t ex järnsvamp) och därmed av utvecklingen på världsmarknaden för järnmalm.

samt elbilar (t ex neodym, terbium, praseodym). Utbudet av dessa metaller är därför okänsligt för prisförändringar, och detta leder i sin tur till stora fluktuationer i priserna (se vidare avsnitt 2.4). Denna brist på flexibilitet blir tydlig då efterfrågan på huvud- respektive biprodukterna inte förändras i samma takt över tid. Metallen rutenium används t ex bland annat i hårddiskar, och utgör en biprodukt till platina. Efter sekelskiftet ökade efterfrågan på rutenium kraftigt men produktionen ökade endast marginellt eftersom motsvarande efterfrågeökning inte skedde för platina. Det finns även exempel där politiska regleringar kan få konsekvenser för utbudet av olika kritiska metaller. Ett exempel är då lagstiftning infördes för att fasa ut användningen av bly. Detta ledde till en reduktion i produktionen av biprodukterna antimon och vismut, och där antimon används i ny batteriteknologi. Ett annat exempel är då strängare kväverening infördes. Detta innebar en ökad efterfrågan på rodium (som används i katalysatorer). Rodium produceras dock som biprodukt till platina vars efterfrågan minskade under samma period, bl a på grund av en dämpad efterfrågan på dieselmotorer (sedan 2016). Den ökade efterfrågan på rodium kunde därför inte mötas upp av ett ökat utbud av metallen, och som ett resultat ökade priset på rodium tiofalt mellan åren 2017 och 2020.

Ett sätt att hantera en sådan bristande tillgänglighet på metaller är substitution till andra mer tillgängliga (och mer priskänsliga) metaller. Denna möjlighet är dock inte alltid stor. Den bästa substitutmetallen till en metall som produceras som biprodukt är i regel en annan biprodukt, som dock produceras tillsammans med samma huvudprodukt på grund av liknande fysikaliska och kemiska egenskaper. Ett annat sätt är att, t ex med hjälp av teknologisk utveckling, öka utbytet av biprodukter i den primära produktionen. Ofta har dessa utbyten varit relativt låga. I andra fall har effektiviteten i produktionen inneburit tydliga ökningar i utbudet av biprodukter. Ett sådant exempel är indium, som produceras som biprodukt till zink, och vars produktion har ökat mångfalt mer än zinkproduktionen under de senaste 50 åren.

2.3.2 Sekundär produktion

Ytterligare ett sätt att öka det framtida utbudet av innovationskritiska metaller som produceras som biprodukter är naturligtvis att stimulera återvinning från uttjänta produkter. Det brist på flexibilitet som kännetecknar utbudet av innovationskritiska metaller från primär produktion kan till och med ses som en konkurrensfördel för den sekundära produktionen. Forskning visar dock tydligt att även utbudet av metallskrot tenderar att vara okänsligt för prisförändringar. En rad empiriska studier visar att detta gäller för exempelvis sekundärt aluminium samt bly- och kopparskrot. Motsvarande studier tillämpat på utbudet av innovationskritiska metaller är färre, men i en vetenskaplig artikel från 2020 visas hur återvinningsgraden av metaller från uttjänta hemelektronikprodukter ökar då priserna ökar, men att storleken på denna effekt är blygsam.

Denna brist på flexibilitet beror i detta fall på att utbudet av metallskrotet är mer eller mindre direkt relaterat till tidigare års konsumtionsmönster och

nivåer. Utbudet av sådant metallskrot som uppstår efter användning av olika produkter och konstruktioner kommer under ett givet år att bero på både *flödet* av metallinnehållande produkter som tagits ur bruk under året, och den totala *stocken* av liknande produkter och konstruktioner som ännu inte återvunnits. Det skrot som inte återvinns i år kommer att bidra till en ökad framtida stock av skrot, som består av det ackumulerade flödet under tidigare år. Denna stock kommer således att öka i storlek om volymen återvunnen metall är lägre än det inkommande flödet, och – omvänt – med en hög nivå på återvinningen relativt detta flöde minskar i stället stocken. Eftersom tillgängligheten på skrot är en funktion av omfattningen av – och karaktären på – tidigare perioders konsumtion, kommer dagens flöde av metallskrot att bero på den ekonomiska tillväxten under dessa tidigare perioder. En hög tillväxt är i regel starkt kopplad till en hög användning av metaller. Inte minst under perioder av industrialisering och omfattande investeringar i byggnader och infrastruktur leder tillväxten till en ökad tillgång på metallskrot. Konstruktionernas och produkternas livslängd spelar naturligtvis också roll.

Utbudet av metallskrot kommer givetvis även att – utöver priset på marknaden – påverkas av kostnaderna för insamling och bearbetning av avfallet. En viktig anledning till att effektiva återvinningmarknader för de flesta bulkmetaller har växt fram över tid är – utöver att dessa har ett relativt högt ekonomiskt värde – att det har varit förhållandevis lätt och billigt att samla in och bearbeta stora volymer rent material, t ex i samband med demonteringen av byggnader och infrastruktur. Som påpekats ovan är tillgängligheten på de flesta innovationskritiska metaller en mer komplex historia. Återvinningen av olika metaller från uttjänta bilar och hemelektronik påverkas av koncentrationen av dessa metaller i produkten, samt av i vilken mån metallerna ingår i vissa legeringar och således interagerar med varandra samt med andra spårelement och föroreningar. I vissa fall finns ingen effektiv teknologi för att ta hand om metallerna, och i vissa fall är det bara manuell demontering som är möjlig.

2.4 Prisbildningen

Många bulkmetaller – såväl primära som sekundära – säljs på stora öppna marknadsplatser, inte minst London Metal Exchange (LME), men även via långsiktiga bilaterala kontrakt. I det senare fallet utgör priserna på börserna en viktig utgångspunkt för de villkor som sätts i kontrakten. För de flesta innovationskritiska metaller saknas i regel öppna marknadsplatser (undantaget t ex kobolt och litium som båda säljs på LME); i sådana fall blir behovet av att etablera direkta industrikontakter större.

Marknaderna för såväl primära som sekundära metaller är volatila, dvs priserna fluktuerar ofta relativt mycket över tid. Detta kan kopplas till ovan diskuterade egenskaper på efterfråge- och utbudssidan av marknaderna, inte minst kombinationen av en inkomstkänslig efterfrågan och ett prisokänsligt utbud. Till detta kan adderas att ibland skiftar efterfrågan på metaller snabbt som ett resultat av produktinnovation. Under perioder av hög ekonomisk

tillväxt får vi en stor efterfrågeökning på metaller, och eftersom utbudet begränsas av såväl existerande produktionskapacitet som tillgången på skrot (i den sekundära produktionen), stiger priset på marknaden. En viktig anledning till den långsamma anpassningen av utbudet är även att investeringar i nya gruvor är kapitalintensiva och etableringen av ny gruvverksamhet kan fördröjas på grund av utdragna tillståndsprocesser.

I fallet med bulkmetaller är priserna på metallskrot typiskt sett mer volatila än motsvarande priser för metaller baserade på primär produktion. Detaljerad information om prisutvecklingen för de innovationskritiska metallerna är inte lika tillgänglig. Den övergripande bilden är dock att priserna på olika innovationskritiska metaller från *primär* produktion har varit betydligt mer volatila än motsvarande priser för bulkmetallerna. Detta gäller om vi jämför prisutvecklingen för kobolt med t ex dem för aluminium och koppar. Priserna på olika sällsynta jordartsmetaller, t ex terbium (det senare en komponent i t ex lågenergilampor), har ibland förändrats med flera multipler på bara några få år. Detta kan – som vi redan har konstaterat – kopplas till att många innovationskritiska metaller produceras som biprodukter. Transparensen på marknaderna för återvunna innovationskritiska metaller är idag låg, bl a som en följd av att återvinningsnivåerna fortfarande är blygsamma. I takt med att dessa marknader mognar över tid är det dock sannolikt att även dessa priser även fortsatt kommer att uppvisa en hög volatilitet. Ibland framhålls att ökad återvinning av innovationskritiska metaller kan bidra till att undvika de prisfluktuationer som observerats för de primära alternativen men detta är långt ifrån självklart (se även avsnitt 2.5.2).

2.5 Barriärer för metallåtervinning

De egenskaper som kännetecknar marknaderna för återvunnen metall – och i mångt och mycket marknader för återvunna material i allmänhet – skapar åtminstone tre viktiga barriärer för ökad återvinning av metaller. Dessa barriärer utgörs av – eller är en konsekvens av – mer eller mindre fysiska begränsningar, som bland annat kan kopplas till att tillgången på metallskrot är direkt relaterad till tidigare tidsperioders konsumtionsnivåer och mönster.

2.5.1 Tillgången på metallskrot vid olika tidsperioder

En viktig begränsning för ökad återvinning av metaller är idag att tillgången på återvinningsbart material är betydligt lägre än nuvarande användning av metaller. Under de senaste 20 åren har efterfrågan på t ex stål och aluminium men även en rad innovationskritiska metaller varit hög, inte minst som en konsekvens av den exceptionella makroekonomiska utvecklingen i Kina. De metaller som återvinns idag kommer ofta från primär produktion som skedde på slutet av 1900-talet. Ett exempel är stål där omkring 85 procent av det uppkomna stålskrotet återvinns idag, men där likväl mer än 60 procent av stålproduktionen baseras på jungfrulig järnmalm. Detta innebär att med fortsatt

ekonomisk utveckling – och därmed ökad metallanvändning – kommer det även framgent att finnas ett behov av primär metallproduktion.

I Kina har ökad användning av inte minst stål varit viktig för att möta efterfrågan i ekonomin som helhet; stålet har använts i byggnader, infrastruktur, och maskiner, dvs konstruktioner med långa livslängder. Detta innebär dock att det kommer att dröja innan den metallen är tillgänglig för återvinning.⁴ Den dynamik som kännetecknar de flesta marknader för metallskrot för också med sig att förhållandet mellan utbud och efterfrågan på skrot kan komma att se annorlunda ut i framtiden, dvs om cirka tre-fyra decennier då dagens konstruktioner nått sin fulla livslängd. Vissa forskare har gjort bedömningen att omkring år 2050 kan utbudet av t ex stålskrot överstiga den totala efterfrågan på stål i västra Europa samt Kina. Detta innebär dock inte per automatik att det återvunna stålet kommer att helt konkurrera ut den primära stålproduktionen. För att detta ska kunna ske måste bland annat skrotet i betydligt högre utsträckning användas för andra ändamål, t ex i nya maskiner samt i biltillverkning, och detta innebär stora utmaningar givet dagens teknologi. Att producera högkvalitativt stål från sekundära källor är svårt eftersom olika spårelement (t ex koppar och tenn) ackumulerats i det återvunna materialet, något som i sin tur sänker kvaliteten på detta. Inte minst för bilindustrin är det viktigt med högkvalitativt stål.

De flesta studier, t ex av Världsbanken och svenska Material Economics, tyder dock på en ökad andel återvinning för de flesta bulkmetaller. Material Economics gör t ex bedömningen att 2050 kommer cirka hälften av den totala globala användningen av stål att kunna baseras på sekundär produktion av stål, och Världsbanken kommer fram till att omkring 60 procent av användningen av aluminium i världen kan komma att vara baserad på sekundär produktion (jämfört med cirka en tredjedel idag). Motsvarande bedömningar för olika innovationskritiska metaller är inte lika lätt att identifiera. Helt klart är att även den framtida användningen av dessa metaller kommer att vara starkt avhängig vilken kvalitet som det framtida utbudet av metallskrot har samt i vilka produkter och konstruktioner metallerna behövs (se vidare kapitel 3). Idag pekar flertalet studier på att den framtida användningen av innovationskritiska metaller kommer att öka i en hög takt under de kommande tre decennierna, inte minst som ett resultat av utbyggnaden av vindkraft och solenergi samt en ökad användning av elfordon. Detta innebär att efterfrågan på bl a grafit, litium, indium, kobolt och sällsynta jordartsmetaller kan komma att öka med 300–600 procent fram till år 2050. Även om dessa siffror är osäkra bedömningar tyder de på en kraftig tillväxt i efterfrågan; detta innebär i sin tur att de absoluta volymer av metallskrot som kan återvinnas också kommer att öka över tid, men så länge som användningen av innovationskritiska metaller ökar kan

⁴ Forskare har noterat att den uppbyggnad av en stock av metaller i kinesiska konstruktioner som nu skett liknar motsvarande utveckling i USA under tiden närmast efter andra världskriget. Drygt 70 procent av den årliga globala produktionen av koppar kanaliseras då till användning i relativt sett långlivade konstruktioner i USA.

andelen sekundär produktion av total användning förbli relativt låg och behovet av primär produktion kvarstå.

I kapitel 3 diskuteras i mer detalj vilka omständigheter som kan motivera införandet av politisk styrning för att öka återvinningen av metaller. Ett viktigt budskap i rapporten är att det inte finns något direkt sätt för politiken att öka volymerna av metallskrot eftersom utbudet i hög grad är en funktion tidigare konsumtionsnivåer och mönster. Däremot finns ett utrymme för att stärka återvinningsaktörernas incitament att öka kvaliteten och tillgängligheten på detta skrot för att då kunna ta vara på en större andel av det i ny tillverkning (eller direkt återanvändning).

2.5.2 Volatila priser på metallskrotet

Det ekonomiska värdet av metallåtervinning är naturligtvis viktigt för industrins incitament att investera i sekundär produktion, och detta värde bestäms i sin tur av marknadspriset samt av kostnaderna för att samla in, demontera och förädla metallen. Ofta är de enbart de metaller som finns i stora volymer samt betingar ett högt värde per kg som återvinns. I ett utjänt fordon utgör t.ex stål, aluminium och koppar cirka 90 procent av det totala metallvärdet, och relativt stora volymer av dessa metaller kan återvinnas på ett förhållandevis enkelt sätt. För andra metaller är det ekonomiska värdet lägre och demonteringen mer komplex; därför är det i regel ett fåtal metaller utöver de ovan nämnda som återvinns från utjänta fordon (t ex guld, silver, platina och palladium).

Förutsättningarna för investeringar i metallåtervinning påverkas även av osäkerheten om den framtida metallprisutvecklingen, och i forskningslitteraturen är det vanligt att de kraftiga prisfluktuationerna för metallskrot pekas ut som ett viktigt hinder för sådana investeringar. Ibland tas den höga prisvolatiliteten som intäkt för att metallskrotmarknaderna fungerar ineffektivt, och att det behövs en ökad politisk styrning för att stabilisera priserna. Det finns historiska exempel på sådana interventioner. Ett exempel är hur USA införde priskontroller på stålskrot under andra världskriget samt i samband med Koreakriget. Även priserna för jungfruliga råvaror (t ex tenn) har varit föremål för olika former av prisstabiliseringsmekanismer.

Det är osannolikt att sådan politisk styrning skulle kunna bidra till att förbättra marknadernas funktionssätt. En hög prisvolatilitet utgör en dålig indikator på marknadseffektivitet. Även om vissa marknadsmisslyckanden, t ex höga transaktionskostnader (se kapitel 3), i princip kan bidra till ökade prisfluktuationer, är det rimligt att i första hand hänföra dessa till interaktionen mellan utbud och efterfrågan, dvs en kombination av en inkomst- och innovationskänslig efterfrågan samt ett prisokänsligt utbud. I den mån det finns marknadsmisslyckanden är dessa dessutom produkt- snarare än materialspecifika. Att stabilisera prisnivån på ett visst metallskrot blir med andra ord ett alldeles för trubbigt politiskt instrument; eventuella marknadsmisslyckanden bör hanteras mer direkt. Ett annat skäl till att avstå från olika prisstabiliseringsmekanismer

är att de historiska erfarenheterna av sådana avskräcker. Ett problem har varit kopplat till svårigheterna att bestämma den jämviktsnivå kring vilken priserna borde stabiliseras över tid. Snarare bör marknadsaktörerna på egen hand nyttja de olika möjligheter till prissäkring som de finansiella marknaderna redan erbjuder.

Vi har ovan konstaterat att även de primära innovationskritiska metallerna uppvisar en hög prisvolatilitet eftersom de produceras som biprodukter. Eftersom de återvunna metallerna uppvisar en minst lika hög prisvolatilitet är det inte givet att detta ökar konkurrenskraften för de sekundära alternativen. Under vissa förutsättningar kan detta dock vara fallet. I kapitel 4 beskrivs t ex hur användare av industriella katalysatorer (t ex oljeraffinaderier, kemifabriker, etc.) tillämpar en affärsmodell där de behåller äganderätten över metallerna i katalysatorerna efter att dessa nått sin slutliga livslängd. Främst handlar det om platina, rodium och palladium. På så sätt, och givet de stora prisfluktuationerna för dessa metaller, har dessa aktörer starka incitament att bibehålla metallernas ekonomiska värde över tid.

2.5.3 Teknologiska barriärer

En viktig barriär för ökad metallåtervinning kan kopplas till olika teknologiska restriktioner. Ett konkret exempel är avsaknaden av en automatiserad och kommersiellt gångbar teknologi för demontering av elektroniska komponenter. Här behövs fortfarande manuell demontering. Den primära metallproduktionen har under lång tid gynnats av ekonomiska skalfördelar, dvs låga styckkostnader till följd av produktion i stor skala medan den sekundära produktionen i stället har dominerats av små, decentraliserade företag. Under stora delar av 1900-talet var återvinningsbranschen relativt arbetsintensiv och low-tech även i industrialiserade länder som Sverige, och i många länder globalt – inklusive Kina – står småskalig produktion (insamling) fortfarande för en stor del av de inhemska marknaderna.

Den framtida konkurrensen mellan den primära och sekundära metallproduktionen kommer att vara starkt avhängig möjligheterna att dra fördelar av skalekonomi i produktionen, men likaså av produktivitetsförbättringar i stort. De teknologiska barriärer som gäller på kort sikt kan dock övervinnas med hjälp av investeringar i FoU samt pilot och demonstrationsprojekt, som bidrar till att öka potentialen för metallåtervinning på lång sikt. Teknologisk utveckling har redan lett till stordriftsfördelar, nya teknologier och en konsolidering av skrotmarknaden i många länder. En viktig uppgift för forskningen om metallåtervinningsmarknader har varit att öka förståelsen för vilka incitament som de aktörer som verkar på dessa marknader har att investera ytterligare i sådan utveckling. I avsnitt 3.3 diskuteras dessa incitament (och eventuella brist på incitament), och i kapitel 4 resonerar vi kring hur politiken kan bidra till att främja teknologisk utveckling.

3. Motiv till politisk styrning: misslyckanden på skrotmarknaderna

Forskningslitteraturen pekar ut ett stort antal faktorer som tenderar att motverka återvinningen av metaller. I detta kapitel riktar vi uppmärksamheten mot de sk marknadsmislyckanden som riskerar att underminera förutsättningarna för framväxten av effektiva återvinningsmarknader, och där den politiska styrningen kan spela en viktig roll för att förbättra den incitamentsstruktur som möter aktörerna längs värdekedjan. Utifrån ett samhällsekonomiskt perspektiv existerar de starkaste motiven till politisk styrning i de fall där de incitament som de enskilda aktörerna i återvinningsbranschen möter inte sammanfaller med det som är önskvärt för samhället i sin helhet. I kapitlet identifierar vi tre breda kategorier av marknadsmislyckanden (avsaknad av incitament), som alla riskerar att hämma framväxten av mer effektiva skrotmarknader för olika innovationskritiska metaller:

- negativa externa miljöeffekter där åtgärder för att öka materialåtervinningen – under vissa förutsättningar – kan utgöra ett medel för att internalisera olika miljökostnader (se avsnitt 3.1);
- icke-miljörelaterade marknadsmislyckanden som utöver miljöargumentet kan försvåra framväxten av effektiva marknader för återvunnen metall, t.ex. transaktionskostnader, olika former av informationsbrist, samt externa effekter kopplade till olika produkters återvinningsbarhet (avsnitt 3.2); och
- marknadsmislyckanden kopplade till utvecklingen av ny teknologi som kan underlätta framtida återvinning (t ex genom mer en effektiv och automatiserad demontering av produkter), t ex kunskapsläckage samt brister på kapitalmarknaderna (avsnitt 3.3).

Angående den sista punkten ovan är det centralt att notera att den teknologiska utveckling som är nödvändig inom metallåtervinningen i hög grad kännetecknas av en *socioteknisk* förändring. Det innebär att den även handlar om framväxten av nya aktörsnätverk, samverkansformer, och värdekedjor samt institutionell förändring (t ex ny och reviderad lagstiftning).

3.1 Negativa externa miljöeffekter

Negativa externa miljöeffekter utgör bieffekter av aktörers konsumtion eller produktion i form av försämrade miljö, och som drabbar en tredje part på ett sätt som inte reflekteras i existerande marknadspriser. I mineral- och metallindustrin uppstår dessa effekter längs hela värdekedjan, dvs såväl uppströms som nedströms. Utvinningen av primära råvaror, inklusive efterföljande bearbetning, kan ofta ha en betydande påverkan på miljön, och sådan miljöpåverkan leder till en situation där de privata kostnaderna för utvinning, bearbetning och avfallshantering överlag är lägre än de samhällsekonomiska kostnaderna. En viktig uppgift för miljöpolitiken är därför att internalisera – synliggöra –

dessa negativa externa effekter för de aktörer som ger upphov till dem, detta exempelvis genom skatter på utsläpp och avfall eller andra former av regleringar såsom teknikkrav eller gränsvärden för utsläpp.

I många situationer är dock kunskapen om olika aktörers effekter på miljön begränsad, och det gör det svårt att införa en träffsäker politik. Den miljöpåverkan som orsakas av produkter som blir avfall samt även det beteende som genererar utsläpp i naturen (t ex nedskräpning), bland såväl hushållen som företagen, är i regel diffusa samt svåra att kontrollera och reglera. Flertalet produkter, t ex hemelektronik, produceras i andra länder, och ökad återvinning av material från sådana kan även vara ett sätt att (indirekt) adressera de externa miljökostnader som uppstår i samband med produktion, transport och användning av dessa produkter. Ibland är svårigheterna med att implementera en träffsäker miljöpolitik av politisk – snarare än av praktisk – karaktär. Ett exempel är svårigheterna att etablera en effektiv prissättning av utsläpp av koldioxid på global nivå; på grund av farhågor för s k koldioxidläckage kan enskilda nationer vara obenägna att beskatta sin industri för högt. Att – i linje med den s k avfallshierarkin – stödja återvinning av innovationskritiska metaller kan i detta avseende ses som en form av 'näst-bästa' politik för att hantera (i varje fall vissa) negativa externa miljöeffekter.

En sådan politik bygger givetvis på premissen att miljöpåverkan av sekundär metallproduktion är lägre än motsvarande påverkan från den primära värdekedjan. Forskningen visar att detta är ett rimligt antagande. Det kan exempelvis noteras att den sekundära produktionen av metaller överlag har en lägre klimatpåverkan än den primära, inte minst på grund av en lägre användning av fossilbaserade energikällor. Utsläppen av koldioxid från produktionen av återvunnet stål är exempelvis cirka 10–40 procent av utsläppen från primär stålproduktion och motsvarande andel för sekundärt aluminium är 5–20 procent.⁵ Forskare har därutöver dragit slutsatsen att även om återvinningsgraderna för de innovationskritiska metallerna är betydligt lägre än motsvarande nivåer för bulkmetaller som koppar och aluminium, är miljöpåverkan av primärproduktionen typiskt sett högre för den förstnämnda kategorin. Att öka återvinningen av miljöskäl tenderar med andra ord att vara än mer motiverat för de flesta innovationskritiska metaller jämfört med bulkmetallerna.

3.2 Icke-miljörelaterade marknadsmisslyckanden

Medan föregående avsnitt noterade att förekomsten av negativa externa miljöeffekter utgör ett centralt motiv för att främja en ökad återvinning handlar detta avsnitt om andra faktorer som kan försvåra framväxten av effektiva marknader för metallskrot. Det bör noteras att forskningen om dessa marknadsmisslyckanden är långt ifrån omfattande då det handlar om återvinning av olika

⁵ De exakta andelarna i dessa intervall beror i hög grad på vilka energikällor som används för att producera den elektricitet som krävs i produktionsprocesserna för såväl primär som sekundär produktion.

innovationskritiska metaller. Därför är det meningsfullt att basera delar av resonemanget på – och dra lärdom av – erfarenheter från andra metaller, t ex stål och aluminium.

3.2.1 Transaktionskostnader

Transaktionskostnader är de kostnader som marknadsaktörerna måste bära för att genomföra transaktioner, t ex kostnader för att identifiera en motpart samt teckna och upprätthålla ett avtal. Sådana kostnader finns på de flesta marknader och skapar ”friktion” i marknadsmekanismen, men studier tyder på att dessa kan vara speciellt höga för vissa avfallsfraktioner, och tillräckligt höga för att göra den sekundära produktionen mindre attraktiv jämfört med den primära. Ibland kan det vara svårt att identifiera köpare och säljare på grund av höga sökkostnader, t ex i fallet med utbudet av byggnads- och rivningsavfall som tenderar att vara irreguljärt och geografiskt spritt. Sökkostnaderna kan vara speciellt höga i metallåtervinningsmarknader som domineras av många små aktörer, och olika studier argumenterar för att transaktionskostnaderna även kan vara höga i fallet med en del mindre frekvent förekommande innovationskritiska metaller.

En vanlig åtgärd som privata aktörer ofta vidtagit för att reducera transaktionskostnaderna är att teckna långa kontrakt med leverantörer av metallskrot. I fallet med flertalet bulkmetaller har det även etablerats intermediärer, som bland annat kan fungera som inköpsorganisationer för ett större antal återvinnare.⁶ Sådana intermediära aktörer vara viktiga för säljare och köpare som kanske endast deltar i marknaden temporärt. Standardisering har också spelat en viktig roll för att reducera de kostnader som är förknippade med förhandlingar på metallskrotmarknader. För de flesta bulkmetaller är olika klassificeringar etablerade sedan länge, och dessa utgör en viktig utgångspunkt för prisöverenskommelser. Motsvarande klassificeringar existerar dock inte för de innovationskritiska metallerna, vilket bidrar till ökad ”friktion” på dessa marknader.

3.2.2 Informationsmisslyckanden

Ett annat potentiellt motiv för politisk styrning handlar om förekomsten av sk informationsmisslyckanden; dessa kan existera på såväl utbuds- som efterfrågesidan av skrotmarknaderna. På utbudssidan av marknaden knyter denna form av marknadsmisslyckande an till att det ofta kan finnas en osäkerhet om det utbudna materialets innehåll, kvalitet och därmed ekonomiska värde. Kvaliteten på metallskrot har normalt en mycket högre variation än de metallflödena som är baserade på primär produktion.⁷

⁶ I Sverige görs exempelvis affärer i stålskrot ofta upp i ramavtal mellan skrotleverantörerna och JBF (AB Järnbruksförnödenheter), som utgör ett gemensamt inköpsorgan för landets stålindustri. Priserna i kontrakten baseras på den internationella prisutvecklingen.

⁷ Denna osäkerhet kan vara så omfattande att miljöriskerna kopplade till metallåtervinning blir höga. Ett exempel är återvinning av metaller från nedlagda avfallsdeponier, något som

En viktig problematik är förekomsten av *asymmetrisk* information, det vill säga då en aktör inför en potentiell marknadstransaktion har ett informationsövertag gentemot en annan. Köpare kan ofta inte fullt ut bedöma egenskaperna i en given materialström, och säljarna har inte nödvändigtvis några tydliga incitament att delge information om olika produkters egenskaper (bl a eftersom detta kan gynna deras konkurrenter). Ett exempel är hemelektronikindustrin som kännetecknas av globala värdekedjor, och där information om produkternas metallinnehåll samt om hur metallerna är integrerade med andra material, normalt sett inte delges de aktörer som verkar nedströms. En viktig konsekvens av asymmetrisk information är att produkter/material med företrädesvis lägre kvalitet bjuds ut på marknaden. Även om köpare har en hög betalningsvilja för material med hög kvalitet kommer säljarna inte att kunna ta ut ett högt pris på grund av det informationsunderläge som köparna har.

Det som kännetecknar god kvalitet kommer naturligtvis att variera beroende på material och produkt, och det kan t ex kopplas till materialets uthållighet samt förekomsten av spårämnen och föroreningar. Den ökande komplexiteten vad gäller metallinnehållet i olika produkter – t ex mobiltelefoner, bilar, och hemelektronik – innebär dock att problematiken är reell för såväl bulkmetallerna som de innovationskritiska metallerna. För att uppnå önskvärda egenskaper i produkter kan metaller förekomma i ren form, i mer eller mindre komplexa legeringar samt som kemiska föreningar. Ibland behövs även mer komplicerade materialstrukturer, t ex där olika metallegeringar kombineras med keramik och fiber. Alla orenheter i materialen kan inte alltid hanteras metallurgiskt.

Sannolikheten att säljarna bjuder ut sämre kvaliteter på marknaden kommer att variera, och den beror bland annat på kostnaden för att gömma negativa egenskaper och/eller för att åtgärda dessa. Problemet med ”ogynnsamma urval” på marknaderna för återvunna metaller kan vara speciellt omfattande om möten mellan samma köpare och säljare inte är ofta förekommande, och där således inget förtroendekapital mellan dessa har byggts upp. Ett antal åtgärder kan vidtas för att reducera de negativa konsekvenserna av denna form av informationsmisslyckande. Erfarenheter från marknaderna för återvunna bulkmetaller visar exempelvis att en möjlighet är tester och provtagningar (ibland med stöd av standardiserade protokoll). Sådan kvalitetssäkring baseras i hög grad på erfarenhet, som byggts upp under längre tid. I fallet med stålskrot kan det t ex ofta räcka med visuell inspektion samt kännedom om källan, men de innovationskritiska metallerna är ofta integrerade i mer komplexa material vilket komplicerar inspektionen.

Även långa kontrakt kan utgöra en effektiv åtgärd eftersom sådana kontrakt reducerar säljarens incitament att dölja materialets verkliga egenskaper. En aktörs trovärdighet på marknaden byggs i regel upp gradvis över tid; studier har visat att marknaden för stålskrot till viss del har varit uppdelad mellan

Naturvårdsverket har avrått från på grund av en bristande kunskap om exakt vilka material som finns i sådana deponier.

tillfälliga säljare samt sådana säljare som agerar reguljärt på marknaden. Stålvverk har t ex inte möjlighet att minutiöst kontrollera alla skrotleveranser utan förlitar sig på att skrothandlarna med vilka man har långsiktiga kontrakt klarar av att leverera skrot enligt de specifikationer som är överenskomna. I fallet med de flesta innovationskritiska metaller finns idag inte i lika hög utsträckning en marknadsmognad i form av väl etablerade och tillitsbaserade relationer.

De informationsmisslyckanden som berör marknads efterfrågesida handlar om ofullständig information om materialets användbarhet för givna syften. Det är en sak att känna till kvaliteten på en metallskrotleverans, men en annan sak om denna leverans fungerar för att producera vissa slutprodukter. I vissa produktionsprocesser är sekundära metaller så gott som perfekta substitut till de jungfruliga materialen men detta gäller inte alls för andra marknadssegment. Ett exempel på denna problematik är de fall där koppar blandas med stål i återvinningsprocessen. Det kan t ex handla om koppar i elektriska kablar som finns kvar då metallerna från en bil ska återvinnas. Vissa kunder har krav på kopparhalten som ibland kan vara svåra att nå. Detta är ett skäl till att en hel del stålskrot i första hand har använts i relativt sett lågvärdiga applikationer, t.ex. för konstruktionsändamål. I tillverkningen av vissa stålprodukter, bland annat svetstråd och en del tunnplåtsapplikationer, är kraven på lågt kopparinnehåll speciellt strikta, och denna produktion är därför baserad på primär produktion.⁸

Ofta minskar osäkerheten om metallskrotets användbarhet över tid, detta eftersom återvinnarna lär sig mer om hur materialen fungerar i deras produktionsprocesser. Detta har i hög grad skett i exemplet med stål och koppar ovan. För de innovationskritiska metallerna kan dock denna typ av informationsproblem bidra till att underminera etablerandet av mer effektiva marknader, speciellt i de situationer där dessa metaller är svåra eller till och med omöjliga att återvinna i ren form med dagens teknologier.

Bland de åtgärder som kan vidtas för att hantera denna form av informationsmisslyckande finns möjligheten att införa olika generiska produktstandards, dvs standards som är likadana oavsett om produkterna är tillverkade av jungfruliga eller återvunna metaller. Erfarenheterna från stålskrotmarknaden illustrerar i sin tur hur skrotklassificeringarna kan utformas som en direkt följd av stålproducenternas erfarenheter av skrotanvändning i tillverkningen av olika produkter. Om en ståltillverkare är bekymrad över hur specifika spårelement och legeringar påverkar kvaliteten på dess slutprodukt, kan denna information inkorporeras i klassifikationerna av olika skrotkvaliteter. På den svenska marknaden har t ex information om innehåll av koppar, fosfor och mangan inkorporerats på detta sätt. De erfarenheter som återvinnare bygger upp kring

⁸ Även tenn och aluminium förekommer i olika legeringar, och i dessa fall kan metallerna inte alltid återvinnas för samma ändamål. Det mer lågvärdiga aluminiummaterialet används i produktionen av motorblock medan de renare aluminiumströmmarna kan ha betydligt bredare användningsområden.

olika material kan dessutom ibland utgöra en kollektiv nytthet, dvs där andra användare i varje fall delvis kan tillgodogöra sig dessa erfarenheter och dra fördel av dem i den egna verksamheten. Detta kan motivera införandet av of-fentligt stöd till pilot- och demonstrationsprojekt som testar användbarheten för olika skrotkvaliteter (se även avsnitt 4.5).

3.2.3 Externa effekter längs produktkedjan

Externa effekter längs produktkedjan uppkommer då en produkt tillverkas på ett sätt som ökar kostnaderna för att återvinna materialet i produkten i en annan sektor eller industri. Det existerar i dessa fall inte något sätt för metallåtervin-naren att skapa incitament för tillverkarna att ändra produktens utformning samt återvinningsbarhet. Det är viktigt att notera att denna typ av extern effekt är väsensskild från den externa miljöeffekt som diskuteras ovan; att adressera negativa externa effekter rörande produktdesign bidrar inte nödvändigtvis till lägre miljöpåverkan per se men innebär att kostnaderna för att öka återvin-ningsgraden – som i sin tur leder till en lägre miljöpåverkan – kan reduceras.

Problemet med bristande återvinningsbarhet är, som påpekats ovan vanligt på marknaderna för återvunna metaller; en väsentlig andel av den metall som samlas in kan inte återvinnas på grund av olika orsaker. I vissa fall kan även politisk lagstiftning bidra till att försvåra återvinning av metaller och andra material i senare led. Den Europeiska miljöbyrån har exempelvis pekat på hur olika länders lagstiftning kring byggbestämmelser har bidragit till detta. Det är inte alltid samhällsekonomiskt försvarbart med en produktdesign som underlättar materialåtervinning i senare led; ofta existerar en avvägning mellan en utformning som ökar produktens värde på marknaden å ena sidan och en som ökar återvinningsbarheten å den andra. Den viktiga poängen här är att ofta finns starka *incitament* att åstadkomma det förstnämnda men mycket få inci-tament att ta hänsyn till det sistnämnda.⁹

Det finns exempel på hur denna typ av negativa externa effekter kan inter-naliseras vid en direkt transaktion mellan den som tillverkar produkten och den som ska återvinna den (eller vid en situation där materialflödena sker inom ett vertikalt integrerat företag). I avsnitt 4.3 återkommer vi till några specifika exempel på detta. Den ekonomiska forskningen visar att i en situation där en parts (t ex ett företags) aktivitet har en negativ extern effekt på en annan part kan frivilliga överenskommelser leda till effektiva utfall (dvs den externa ef-fekten internaliseras i parternas beslut), men detta gäller endast om: (a) det inte

⁹ Ofta framhålls att denna brist på incitament för återvinningsbarhet utgör ett ”tekniskt” hinder, och att det därför krävs forskning kring nya teknologier. Statens huvudsakliga roll på detta område skulle då vara att (del)finansiera forskning och demonstration för förbättrad produktdesign och ökad återvinningsbarhet. Även om detta kan vara nog så viktiga statliga åtgärder (se vidare avsnitt 4.5), adresserar de dock inte det underliggande problemet med negativa externa effekter i produktlivscykeln. Forskningen kan givetvis bidra till att tillhanda hålla ny teknologi (se avsnitt 3.3), men tillverkarna av de produkter som innehåller potentiellt återvinningsbara metaller måste också ha incitament att implementera dessa teknologier.

finns några transaktionskostnader (eller att dessa är tillräckligt låga); samt att (b) äganderätterna (över materialet) är väl definierade. Forskning visar tydligt att sannolikheten för att dessa former av frivilliga lösningar förekommer är högre om de ekonomiska transaktionerna sker mellan två företag (s k business-to-business, B2B). Ett område som är speciellt intressant är möjligheterna att återvinna den sällsynta jordartsmetallen neodym från magneter till elmotorer. I detta fall finns dock i stort sett alla magnetstillverkare i Asien vilket försvårar möjligheterna till samarbeten som kan bidra till att förenkla återvinningsprocessen.

I många andra sammanhang är det betydligt svårare för de inblandade parterna att internalisera de negativa externa effekterna, inte minst då det gäller metallåtervinning från produkter som ägs (eller har ägts) av privata konsumenter (business-to-consumer, B2C). Starka incitament för återvinningsbarhet kan uppstå om återvinnaren känner till vilket företag som sålt de produkter som den handhar, men på en marknad för konsumentprodukter är de administrativa kostnaderna för att implementera ett sådant förfarande sannolikt höga. Transparensen i metallflödena är låg (bland annat på grund av internationell handel), och metallen byter ägare vid varje ekonomisk transaktion.

I de situationer där vi kan förvänta oss en hög återvinningsgrad från konsumentprodukter även utan politisk styrning handlar det därför ofta om metaller med höga ekonomiska värden, t ex guld och silver i smycken. Höga priser är samtidigt inte någon garanti för att produkttillverkarna har tillräckliga incitament att ta hänsyn till produkters återvinningsbarhet; forskning visar t o m på en okunskap bland tillverkare om metallvärdet i deras produkter.

3.3 Innovationsrelaterade marknadsmisslyckanden

Att återvinningen av innovationskritiska metaller, t ex litium från bilbatterier, fortfarande är på en låg nivå beror dels på bristande incitament att utnyttja de möjligheter till metallåtervinning som dagens teknologi erbjuder (se avsnitten 3.1–3.2), dels på *avsaknaden av* effektiv teknologi. Ett exempel är bristen på en automatiserad och kommersiellt gångbar teknologi för demontering av elektroniska komponenter; i detta fall är manuell demontering fortfarande nödvändig. Ny kunskap – t ex kring olika metallurgiska processer – är också viktig för att möjliggöra framtida metallåtervinning från komplexa produkter och materialflöden (t ex gruvavfall), samt för att spåra produkter över livscykeln och koppla detta till en databas över produkternas innehåll och egenskaper. Forskning har, bland annat baserat på kvantitativa analyser av patentdata, pekat på en något vikande innovationsaktivitet inom återvinnings- och avfallssektorn.

Behovet av teknologisk utveckling inom metallåtervinningen är starkt kopplat till betydelsen av skalfördelar och produktivitetsförbättringar i konkurrensen med primär metallproduktion. Forskningen visar att historiskt sett har dessa varit omfattande i den primära produktionen, och de har på så sätt bidragit med lägre produktionskostnader trots överlag lägre malmhalter i t ex

koppar- och järnmalmsfyndigheter. Förutsättningarna för en hög produktivitet och storskalighet i den sekundära produktionen är sannolikt goda. Ett skäl till detta är att den stock av potentiellt återvinningsbart material som lagrats i samhället under lång tid har vuxit i snabb takt under de senast decennierna, och detta gör det mer ekonomiskt lönsamt med storskaliga investeringar i metallåtervinningsanläggningar.¹⁰ Det finns dock utmaningar, bl a kopplat till att utformningen av och innehållet i olika produkter med korta livslängder förändras, och ibland i mycket snabb takt. Detta kan göra det svårt att skapa ett kontinuerligt lärande i produktionen.

Resterande delar av detta avsnitt diskuterar potentiellt viktiga marknadsmisslyckanden, som kan leda till försvagade incitament till investeringar i metallåtervinningssektorns teknologiska utveckling. En viktig utgångspunkt är att utvecklingen av ny teknologi sker i flera iterativa steg, från grundläggande kunskapsutveckling, optimering, uppskalning och vidareutveckling (i pilotanläggningar), marknadsformering i form av etableringen av nya värdekedjor samt institutionell förändring, och – slutligen – kommersiell spridning och användning på marknaden. En annan central komponent i utvecklingen av nya teknologier är den täta interaktion som normalt finns mellan aktörer, nätverk, och institutioner. För etablerade teknologier har dessa interaktioner i regel hunnit etablerats under lång tid men motsvarande interaktioner är typiskt sett mindre utvecklade i fallet med mer omogna teknologier. Detta kan bidra till att snedvrider konkurrensen mellan etablerade och nya teknologier och industrier, t ex mellan den primära och sekundära produktionen av metaller.

Forskningen har visat att styrmedel vars syfte är att öka materialåtervinningen, t ex producent-ansvar, även kan stimulera utveckling av ny återvinningsteknologi (t ex sådan som underlättar demonteringen av utjänta bilar). Studier har även visat att den ökade återvinningen av bl a bly, tenn, silver och guld från elektronikskrot möjliggjorts av nya innovation, som EU:s direktiv för elektronikskrot stimulerat fram. Såsom antytts ovan finns dock marknadsmisslyckanden som specifikt kan hänföras till förutsättningarna för teknologisk utveckling. I resten av detta avsnitt diskuteras två sådana misslyckanden, och som en tredje punkt tar vi även upp hur institutionell tröghet – dvs lagstiftning, normer – kan utgöra barriärer för utvecklingen och introduktionen av ny teknologi.

3.3.1 Ny kunskap är en kollektiv nytthet

Ett marknadsmisslyckande handlar om att ny kunskap ofta utgör en kollektiv nytthet, dvs en nytthet som när den väl tillhandahållits kan användas samtidigt av flertalet aktörer till en låg kostnad. Ett företag som utvecklar ny

¹⁰ Ett exempel på en modern, storskalig återvinning av ädelmetaller samt en rad olika innovationskritiska metaller från elektroniska produkter är Umicores anläggning i Belgien. I denna återvinns årligen 30 ton guld, 37 ton av platinagruppens metaller, 1000 ton silver och totalt 68 000 ton av andra metaller. Produktionen av guld motsvarar den årliga volym som den tredje största guldgruvan i världen genererar.

teknologi kan då inte tillgodogöra sig alla fördelar av sin investering utan dessa ”spiller över” och gynnar även andra aktörer. Den privata avkastningen blir lägre än den samhällsekonomiska, och de privata incitamenten att investera i sådan kunskap blir därmed för låga. Sådana positiva externa effekter kan uppstå som ett resultat av FoU under konceptutvecklingsfasen men även uppstå som ett resultat av olika lärandeprocesser under den sk marknadsformeringsfasen. Detta lärande (t ex ’learning-by-doing’) leder till en kontinuerlig effektivisering och prestandaökning i nya produktionsprocesser och produkter.

Denna form av kunskapsspill finns givetvis i många sektorer, men det är sannolikt att metall- och mineralindustrin, inklusive metallåtervinningssektorn, hör till en av de sektorer där sådana effekter är framträdande och där således företagen har underinvesterat i ny kunskapsutveckling. Metall- och mineralindustrins FoU-intensitet har varit låg jämfört med andra industrisektorer såsom olja, gas, papper och massa. Ett skäl är att kunskapsspill ofta är frekvent förekommande i fallet med komplexa teknologier och produktionsprocesser, dvs sådana som bygger på ett stort antal komponenter med tillhörande expertis. Dessa egenskaper innebär i sin tur att företagen ofta finner det mindre meningsfullt att patentera nya innovationer. Ett annat skäl till de relativt svaga incitamenten till FoU är att för företag i metall- och mineralindustrin är möjligheterna till produktdifferentiering låg.¹¹

I en framtid med betydligt högre återvinningsgrader för de innovationskritiska metallerna kan förutsättningarna för kunskapsspill komma att se annorlunda ut, men det är svårt att detta skulle innebära försvagade motiv till politisk styrning, t ex i form av stöd till FoU och demonstration. Även den framtida sekundära metallproduktionen kommer att vara beroende av komplexa och storskaliga produktionsprocesser, samt på affärsmodeller som bygger på täta samarbeten mellan flera aktörer med olika kompetenser. En möjlig förändring är att andelen små företag med specialistkompetens (t ex kopplat till specifika metallurgiska metoder) ökar. Tidigare forskning visar samtidigt att kunskapsspill kan vara speciellt framträdande för små företag som samverkar med större företag; mindre företag kan uppleva det svårt att försvara sina immateriella tillgångar gentemot de större.

3.3.2 Kapitalmarknadens förmåga att hantera risker kopplade till nya teknologier

Det andra marknadsmisslyckandet knyter an till att privata aktörer är ovilliga att acceptera de investeringsrisker som är kopplade till utvecklingen av nya teknologier, åtminstone i en sådan omfattning som är önskvärd utifrån ett samhällsekonomiskt perspektiv. Med risker avses här risker kopplad till den teknologi som utvecklas, t ex rörande uppskalning och optimering av teknologin. Riskerna kan också handla om den framtida marknadens storlek, vilka

¹¹ Här åsyftas inte de produkter i vilka många metaller ingår (t ex mobiltelefoner, datorer) – där är produktdifferentieringen i regel hög – utan snarare på de olika skrotkvaliteter som återvinningsindustrin producerar och säljer.

produkter som kommer att efterfrågas, samt formerna för arbetsdelning mellan aktörer i värdekedjan. En tredje typ av risk berör den framtida utformningen av politiska styrmedel och institutioner. De finansiella aktörerna på kapitalmarknaderna (låneinstituterna) kan dessutom ofta ha svårigheter att bedöma dessa risker, inte minst på grund av en avsaknad av empirisk information och data baserat på vilka de kan göra adekvata riskbedömningar.¹²

Metallåtervinningsindustrin har några egenskaper som kan göra det svårt för privata aktörer att ta sig an höga långsiktiga investeringsrisker. De nya produktionsprocesser som är nödvändiga för effektiv metallåtervinning från komplexa produkter, t ex genom automatisk demontering, är ofta på konceptutvecklingsstadiet och de behöver därför verifieras, optimeras och skalas upp. Utfallet av detta är osäkert. Teknologier med hög komplexitet, t ex sådana som bygger på ett stort antal komponenter med tillhörande expertis, tenderar också att möta relativt höga risker, och effekterna kommer att vara speciellt negativa i samband med kapitalintensiva investeringar.

Betydelsen av höga risker för gröna investeringar understryks ytterligare av den kontext i vilken sådana investeringar ganska ofta sker: en omogen marknad, stor osäkerhet kring teknikval samt till stabiliteten i de relevanta politiska styrmedlen. Forskare framhåller att förekomsten av en kombination av negativa externa miljöeffekter och innovationsmisslyckanden stärker behovet av politisk styrning för att stödja teknologiutvecklingen. Detta blir speciellt viktigt då centrala styrmedel som syftar till att internalisera de externa miljökostnaderna inte finns på plats eller är ineffektivt utformade, t ex avsaknaden av högt pris på koldioxid på global nivå. Vissa studier har också pekat på de osäkerheter som präglar den geopolitiska situationen kopplat inte minst till Kinas dominans då det gäller produktionen av sällsynta jordartsmetaller. Hur skulle t ex Kina agera om den sekundära produktionen av dessa metaller ökade väsentligt i Europa och USA, t ex kopplat till landets förmåga att påverka de framtida priserna på sällsynta jordartsmetaller?

3.3.3 Institutionella barriärer

Institutionerna utgör ”spelreglerna” i ekonomin; dessa består av såväl formella regler i form av lagstiftning som informella regler i form av normer och etablerad praxis i olika organisationer. Betydelsen av institutioner och institutionell förändring för ökad återvinning av de innovationskritiska metallerna har bland annat betonats av det Nordiska Ministerrådet.

När det gäller de informella institutionerna pekar forskningen på en låg FoU-intensitet i den globala gruvindustrin, och detta innebär att många gruvföretag kan ha svårt att förhålla sig till och tillämpa ny kunskap och nya teknologier. Företagen har en låg sk ”mottagningsförmåga” (*absorptive capacity*). Det finns även tecken på en brist på effektiv samverkan mellan aktörer

¹² Det finns forskning som argumenterar för att även i de fall där kapitalmarknaderna fungerar effektivt kan det finnas incitamentsproblem (s k principal-agentproblematik) på företagsnivå. Dessa bidrar till ett för starkt fokus på korta- kontra långa investeringshorisonter.

med kompletterande kompetenser.¹³ Forskning har framhållit att innovationsarbetet inom den globala gruvindustrin har varit förhållandevis inåtvänt ("inward focus"), dvs karakteriserat av ett begränsat samarbete kring utvecklingsfrågor med andra företag.

I detta sammanhang har svensk gruvindustri till viss del utgjort ett undantag. Svenska gruvbolag som LKAB och Boliden har haft en relativt hög nivå på sina FoU-investeringar, och även aktivt samarbetat med (i första hand) olika utrustningsleverantörer. LKAB:s utvecklingsarbete kring utvinnande av fosfor samt sällsynta jordartsmetaller är ytterligare ett exempel, och involverar ett nära samarbete med bl a Boliden samt med jordbrukssektorn. Det har dock påpekats att även svensk gruvindustri är i behov av att ytterligare utveckla sitt innovationssystem, t ex i form av ett ökat inslag av sköppen innovation. Det senare handlar om att samverka bredare och öppna upp för möjligheten att hämta in nya idéer från många håll.

När det gäller de formella institutionerna har olika studier pekat på problem med den nuvarande lagstiftningen, som riskerar att utgöra barriärer för ökad metallåtervinning. För det första är det viktigt att konstatera att precis som all industriell verksamhet är även metallåtervinningssektorn beroende av väl fungerande ramvillkor i form av transparent lagstiftning kring kontraktsfrågor, markanvändning, miljöpåverkan, avfallshantering, etc. Sådana ramvillkor är viktiga för att den typ av (B2B) samarbeten mellan tillverkare och återvinnare som beskrevs i avsnitt 3.2.3 ska bli av. En aktuell fråga i en svensk kontext är miljöbalksprövningen av industriell verksamhet, som ibland har bidragit till att öka investeringsriskerna, bl a i form av utdragna tillståndprocesser och frekventa överklaganden. Även avfallsagstiftningen, som bygger på EU:s avfallsdirektiv, kan skapa problem för metallåtervinning i vissa fall. Det finns en utmaning i hur samhället bör reglera hantering och användning av "avfall", och när avfallet kan betraktas som en "produkt" (och därmed kan handlas på en marknad). I detta sammanhang har exempelvis EU:s sk 'end-of-waste' bestämmelser fått kritik av forskare, inte minst eftersom det ofta i praktiken endast är avfall som redan cirkuleras som får klassificeras som en produkt. Röster har därför höjts för att bredda denna binära indelning av material, och tillåta mer heterogenitet. Avfall utgör såväl en möjlighet som en risk för samhället, och kanske är det så att dagens lagstiftning fokuserar för lite på möjligheterna och relativt sett för mycket på de direkta hälso- och miljöriskerna.

Ett annat exempel handlar om den lagstiftning som reglerar handeln med avfall och skrot mellan länder. Inom EU ökar metallåtervinningen från uttjänta fordon. Ett problem är dock den (ibland illegala) exporten av äldre fordon som sker till länder utanför unionen, vilket har inneburit en begränsad tillgång på använda katalysatorer för effektiv återvinning i moderna anläggningar. På

¹³ Tidigare studier har visat att i Storbritannien har det funnits en brist på samverkan mellan skrothandlare och stålproducenter, bl a kopplat till oviljan att delge information om varandras processer (t ex kring specifikationskrav och eventuella problem) eftersom sådant utbyte av kunskap ger den andra parten ett överläge i prissförhandlingarna.

denna punkt finns därför ett behov av att reformera lagstiftningen i form av att dels klargöra när ett fordon nått dess slutliga livslängd ('end-of-life') i det EU-direktiv som reglerar hantering av uttjänta fordon (2000/53/EG), dels lägga större ansvar och bevisbörda på exportörerna.

Ett annat sätt att reducera problemen med illegal hantering av uttjänta produkter är att reducera de administrativa kostnaderna för att leva upp till lagstiftningen, t ex de aktuella EU-direktiven. Som en följd av den sk avfalls-transportsförordningen (EG 1013/2006) är det t ex administrativt krångligt att transportera metallavfall mellan länder inom EU och ännu krångligare om handeln sker med icke-OECD länder. De metaller som klassas som "farligt avfall" inbegriper framförallt sådana som är vanligt förekommande i legeringar, t ex bulkmetallerna koppar och nickel samt de innovationskritiska metallerna kobolt, volfram och sällsynta jordartsmetaller. De regler som finns kring handeln med farligt avfall, inklusive de administrativa kostnader som följer av att följa dessa, påverkar möjligheterna att utveckla en konkurrenskraftig återvinning av metaller.¹⁴ Inte minst riskerar sådana handelshinder att reducera utsikterna för att återvinningsindustrin ska kunna dra nytta av stordriftsfördelar i produktionen.

4. Vägval för den politiska styrningen: fem övergripande lärdomar

Detta kapitel utgör ett försök att – med utgångspunkt i de marknadsmisslyckandena som diskuterades i kapitel 3 – syntetisera ett antal generella lärdomar för utformningen av en politik som syftar till att främja en ökad återvinning av innovationskritiska metaller. Med stöd i tidigare forskning identifieras samt diskuteras fem övergripande lärdomar för den politiska styrningen på området. Även om viktiga poänger emellanåt exemplifieras med hänvisningar till specifika styrmedel, har kapitlet inga ambitioner att ta fram detaljerade rekommendationer om valet av styrmedel. Ett viktigt skäl till detta är att forskningen om erfarenheter av existerande styrmedels effekter på återvinningen av olika innovationskritiska metaller fortfarande är i sin linda.

4.1 Anamma ett produkt- snarare än ett materialperspektiv

Den ökade komplexiteten i moderna produkter har försvårat återvinningen av metaller, och återvinningen av innovationskritiska metaller från andra källor, t ex gruvavfall, innebär också viktiga utmaningar. Överlag är det därför viktigt att politiken tar explicit hänsyn till de specifika kontexter i vilka olika metaller finns tillgängliga. I praktiken handlar detta om att gå bortom ett fokus på

¹⁴ OECD:s bedömning är att cirka 40 procent av dagens handel med kopparskrot påverkas av exportbegränsningar medan motsvarande andel för stålskrotet är 20 procent. Det finns dock inga liknande uppgifter om i vilken mån exportbegränsningar påverkar handeln med olika innovationskritiska metaller.

material, och i stället fokusera på – inte minst – värdekedjorna för de produkter som innehåller innovationskritiska metaller. Förutsättningarna för återvinning skiljer sig åt mellan olika metaller, men normalt sett i än högre grad baserat på i vilka produkter metallerna ingår. Trenden är också att många produkter kontinuerligt får bättre prestanda och nya funktioner, och detta åstadkoms genom introduktionen av mindre och mindre komponenter, fler integrerade material och nya metallegeringar.

Att anamma ett produkt- snarare än ett materialfokus innebär inte nödvändigtvis att det behövs olika *typer* av styrmedel för olika produktkategorier; många länder – inklusive Sverige – har exempelvis separata producentansvar för bl a elektronik, batterier, samt uttjänta fordon. Den viktiga poängen är snarare att först då vi förstår de incitament som möter aktörerna längs hela produktkedjan är det möjligt att utforma lämpliga styrmedel eller styrmedelskombinationer. Det är också uppenbart att ett styrmedel som passar bra för att främja materialåtervinning av t ex sällsynta jordartsmetaller i en kontext inte nödvändigtvis är lämpligt i en annan kontext. Och även om det finns producentansvarssystem för olika produktgrupper kan det finnas ett behov av att utforma och implementera dessa på olika sätt eftersom förutsättningarna för en effektiv återvinning kan skilja sig åt mellan olika produkter.

En viktig del av den politiska styrningen handlar även om vilka mål som formulerats för metallåtervinningen. Sådana mål finns på såväl nationell nivå som på EU-nivå. Ett exempel på det senare är EU-direktiven för uttjänta bilar respektive elektronikskrot samt det s k produktdesigndirektivet. De mål som fastställts för dessa har dock svagheter utifrån ett metallåtervinningsperspektiv. EU:s direktiv för uttjänta fordon föreskriver en 85 procents återvinningsgrad mätt som vikt, men detta skapar ett för trubbigt incitament för att ta hand om de innovationskritiska metaller som förekommer i små mängder. På motsvarande sätt visar forskning hur viktbaserade återvinningskrav för batterier har inneburit att många företag endast återvinner batteriernas skal av stål eftersom detta utgör den tyngsta delen. På så sätt reduceras incitamenten att t ex försöka återvinna litium och aluminium, inklusive att utveckla och testa ny teknologi som underlättar sådan återvinning. Av denna anledning har forskare diskuterat om producentansvarssystemen (för t ex elektronik) behöver bli mer metallspecifika; denna fråga har bl a väckts i Schweiz.

Ett mer utpräglat produktfokus i politiken är även viktigt för att hantera marknadsmisslyckandet med återvinningsbarhet. Det är överlag centralt att åstadkomma en balans mellan åtgärder som förbättrar produktdesignen vid tillverkningen och åtgärder som förbättrar återvinningssektorns förmåga att ta hand om material när väl produkterna nått sin slutliga livslängd. Om politiken fokuserar på det senare steget i syfte att underlätta för avfallshanterare att ta hand om komplexa material, minskar incitamenten för produkttillverkarna att öka återvinningsbarheten även om en mer balanserad fördelning mellan dessa åtgärder vore mer kostnadseffektiv. Dagens situation präglas överlag av en obalans i detta avseende; fokus ligger i regel på förbättrad avfallshantering snarare än på produktdesign samt återvinningsbarhet.

En av de mest centrala uppgifterna för politiken är därför att öka incitamenten för återvinningsbarhet. Utmaningarna är dock många, och de nuvarande incitamenten tenderar att vara relativt svaga på denna punkt. Traditionellt har såväl ekonomiska intressen som politiska styrmedel främjat materialsubstitution. Om ett givet material eller grundämne stiger i pris eller att dess användning regleras på grund av miljö- och hälsoskäl, har strategin handlat om att byta ut det materialet mot ett annat. Detta har inneburit en minskad användning av farliga substanser och grundämnen (t ex kvicksilver), men ofta har inte tillräcklig hänsyn tagits till hur sådan materialsubstitution påverkar såväl materialfluster som möjligheterna till materialåtervinning.

Forskningen visar också att existerande styrmedel på återvinningsområdet, t ex det svenska producentansvaret som inbegriper metallförpackningar men även bl a elutrustning och batterier, överlag har inneburit svaga incitament till ökad återvinningsbarhet. I fallet med förpackningar betalar producenterna en avgift per kg förpackning; visserligen skapar detta ett incitament att rationalisera bort onödiga förpackningar men återvinningsbarhet är en betydligt mer komplex fråga som inrymmer långt fler aspekter än vikten. Dessutom bygger producentansvarssystemen på ett *kollektivt* ansvar där det ofta inte behöver existera något informationsutbyte mellan det företag som producerar produkten och den aktör som skulle kunna återvinna materialen i denna.

Ett viktigt första steg för att öka förutsättningarna för förbättrad produktdesign (inte minst ökad återvinningsbarhet) är att ställa krav på ökad information om produkters ursprung och innehåll längs hela värdekedjan. Ett sätt är införa sk produktpass. Ett sådant kan ge bättre information om de material som ingår i produkter samt om hur de kan repareras och/eller återvinnas. Studier har också argumenterat för att en enkel märkning av bilmotorer med information om vilka typer av magneter som ingår i bilens elmotorer, skulle vara ett enkelt sätt att öka förutsättningarna för återvinning av t ex neodym. Den svenska regeringen anger i sin handlingsplan för en cirkulär ekonomi att Sverige ska verka för att EU inför produktpass. EU har redan tagit initiativ till att industri-batterier och batterier för eldrivna fordon förses med ett unikt och individuellt pass som ska vara tillgängligt digitalt; den sk batteriförordningen träder i kraft i januari 2022. Det är också viktigt att bibehålla separata producentansvarssystem för olika produkter.

Forskare har även identifierat en del andra former av politisk styrning, som också kan förbättra villkoren för ökad metallåtervinning längs specifika värdekedjor. En potentiellt viktig åtgärd är att ta fram och implementera tydliga kriterier för bästa möjliga teknik i materialåtervinningssystemet. Detta kan kombineras med krav på att avfallsströmmar måste gå till en anläggning som använder en certifierad teknologi. Staten kan även överväga regler rörande produktdesign som underlättar återvinning; i Tyskland har t ex ett förbud mot att integrera litium-jonbatterier i mobil elektronik på ett som försvårar återvinning övervägts. En annan roll för staten handlar om att bidra till att stärka de aktörsnätverk som behövs för att öka återvinningen längs produktkedjan. Det

kan handla om att skapa nya plattformar för aktörssamverkan samt att föreslå nya organisatoriska lösningar (se även avsnitt 4.5).

4.2 Nyttja kombinationer av olika typer av styrmedel

En viktig lärdom som följer direkt på diskussionen om marknadsmisslyckanden i kapitel 3 är att politiken behöver adressera flera marknadsmisslyckanden, och den behöver därför – i många fall – baseras på en kombination av olika typer av styrmedel.

För det första är det viktigt påpeka att en politik som syftar till att stödja återvinning i enlighet med den skavfallshierarkin utgör i hög grad ett substitut till en mer träffsäker – men praktiskt ogenomförbar – politik, t ex i form av skatter och regleringar direkt på utsläpp i vatten och luft. Ekonomisk forskning visar att en politik som aspirerar på att utgöra ett sådant substitut bör bygga på styrmedelskombinationer som genererar (åtminstone) två viktiga incitament: (a) en outputeffekt, t ex genom en skatt/avgift på de produkter som genererar avfall i senare led; samt (b) en substitutionseffekt, t ex genom subvention av återvinning (bl a i form av tillhandhållande av infrastruktur för återlämning) och/eller krav på sortering av olika avfallsströmmar.

Producentansvars- och pantsystem ger – rätt utformade – upphov till såväl en output- som en substitutionseffekt. Ett pantsystem innebär exempelvis att konsumenter har incitament att först hushålla med den avfallsgenererande produkten, och sedan återlämna denna för återvinning på ett miljömässigt acceptabelt sätt. Forskning om styrmedel för ökad materialåtervinning visar på de svårigheter som uppstår då avfallspolitiken enbart adresserar ett av dessa incitament. Skatter på jungfruliga råvaror gör t ex användningen av återvunnet material mer ekonomiskt attraktivt, men på grund av den låga priskänsligheten för det ekonomiska utbudet av sådant material blir effekterna på återvinningen liten om skatterna inte kan kombineras med åtgärder som stimulerar detta utbud (t ex i form av krav på sortering).¹⁵ I sådana fall genereras främst incitament till en outputeffekt medan substitutionseffekten blir blygsam.

Det är inte heller effektivt att enbart fokusera på att stimulera utbudet av återvunnet material, t ex genom att på olika sätt subventionera insamling och sortering. Dels riskerar en sådan isolerad politik att inte vara verkningsfull på grund av ett prisokänsligt och begränsat utbud, dels leder det till en skrekyleffekt; priset på materialet sjunker och incitamenten att minska efterfrågan på detta försvagas som en följd. Outputeffekten blir med andra ord positiv (dvs i form av ökad användning) snarare än negativ.

¹⁵ Forskning om den svenska skatten på naturgrus visar att den framförallt drivit på en ökning i användningen av krossad sten medan effekterna på mängden återvunnet material varit liten. Liknande skatter i andra länder (t ex Danmark) har sedan flera år tillbaka kombinerats med utbudsstimulerande åtgärder i form av krav på sortering av byggnads- och rivningsavfall, och där har effekterna på materialåtervinningen varit tydligare. Motsvarande krav på sortering i Sverige infördes först i augusti 2020.

Såsom påpekas ovan utgör olika producentansvarssystem redan idag en viktig del av Sveriges avfallspolitik. Det bör dock finnas ett utrymme för att utveckla dessa system på olika sätt. Ett sätt är att bredda tillämpningen av dessa system till att omfatta nya produkter. På internationell nivå har det t ex funnits ett intresse av ett nytt producentansvar för vindkraftsturbiner, och vissa länder (bl a Tyskland) har övervägt pantsystem för mobiltelefoner. Det finns dock utmaningar kopplade till införandet av nya styrmedel eftersom samma produktgrupper (t ex batterier) kan innehålla olika typer av bl a sällsynta jordartsmetaller; denna heterogenitet kan göra det svårare att uppnå skalfördelar i hanteringen.

Den forskning som lett fram till slutsatsen om behovet av styrmedelskombinationer antar dock – oftast implicit – att existerande marknader för de återvunna materialen fungerar effektivt, dvs utan någon förekomst av andra former av marknadsmisslyckanden. Politiska styrmedel för att överbrygga informationsproblem (t ex genom standardisering), reducera transaktionskostnader (t ex genom mer transparent lagstiftning) samt för att förbättra produkters återvinningsbarhet (t ex genom att införa s k produktpass) utgör alla potentiella *komplement* till traditionella avfallspolitiska styrmedel såsom olika producentansvars- och pantsystem. Forskning visar dock även att det finns en betydande heterogenitet mellan olika marknader och metaller; på marknaderna för flera bulkmetaller har aktörerna t ex till stora delar överkommit de informationsrelaterade misslyckandena, bl a i fallet med stålskrot. Dessa erfarenheter har dock även illustrerat vikten av att finna lösningar på hur aktörerna ska hantera eventuella informationsasymmetrier och reducera transaktionskostnaderna. Detta är sannolikt problem som kommer att behöva hanteras för att öka återvinningen av innovationskritiska metaller, och politiken behöver uppmärksamma i vilken utsträckning det finns goda förutsättningar för de industriella aktörerna att på egen hand adressera dessa misslyckanden (t ex internalisera eventuell asymmetrisk information) eller om det finns ett behov av politiskt stöd (t ex på EU-nivå kopplat till standardisering och/eller krav på information om produkters innehåll).

I avsnitt 4.3 fördjupar vi diskussionen om hur de industriella aktörerna tillsammans – på frivillig basis – kan bidra till etablerandet av mer effektiva metallåtervinningsmarknader. Nedan – i avsnitt 4.5 – diskuteras även hur styrmedelskombinationer ofta är nödvändiga för att stimulera teknisk utveckling på återvinningsområdet. Där betonas exempelvis hur s k marknadsdrivande styrmedel såsom producentansvaret då behöver kompletteras med offentligt stöd till FoU, pilot- och demonstrationsprojekt, samt s k systemövergripande styrmedel.

4.3 Tänk på att rätt incitament ibland kan existera även i frånvaro av styrmedel

Såsom påpekas ovan visar forskningen på många exempel där marknadsaktörerna själva har klarat av att adressera olika marknadsmisslyckanden på ett bra

sätt. Vissa skrotklassificeringar och standards (t ex för test av skrotkvaliteter) har initierats av branschorganisationer, och detta har reducerat informationsmisslyckandena på utbudssidan. I andra fall har vertikal integration också motverkat denna problematik. Det finns också exempel B2B-samarbeten där användare av produkter innehållande metaller samverkar med återvinnare, och bl a bibehåller äganderätten över metallen. Sådana samarbeten har skapat incitament för förbättrad produktdesign, och gör det även möjligt för företagen att undvika att exponera sig för kraftiga prisfluktuationer på vissa innovationskritiska metaller.

Ett svenskt exempel på detta är hur återvinningsföretaget Stena Recycling har samarbetat med biltillverkare. Investeringar i fragmenteringsanläggningar har skett i nära dialog med inte minst Volvo AB. Detta informationsutbyte har varit väsentligt inte bara för utformningen av dessa anläggningar utan även för biltillverkarnas produktionsprocesser och materialval. Samarbetet har lett till framväxten av en affärsmodell där de samverkande företagens ingenjörer har getts stort utrymme att tillsammans identifiera effektiva lösningar för ökad återvinningsbarhet av fordon, inklusive processinnovation.

Ett annat intressant exempel är metallåtervinning av framförallt platina, palladium och rodium från katalysatorer. Katalysatorer används bland annat inom processindustrin (t ex raffinaderier) för rening av gaser och vätskor. Tidigare sändes förbrukade katalysatorer iväg för destruktion, en förhållandevis dyr hantering. Under de senaste två decennierna har dock återvinningen av metaller från katalysatorer ökat betydligt och den når ibland återvinningsgrader som närmar sig 90 procent. Detta kan kopplas till framväxten av en affärsmodell där användare av katalysatorer, t ex en kemifabrik, samverkar med ett återvinningsföretag. Detta företag utför återvinningen som en tjänst åt kemifabriken, som dock behåller äganderätten till metallen genom hela denna process. En studie från 2019 visar exempelvis att utav den totala användningen av platina i oljeraffinaderisektorn samt den kemiska processindustrin står den återvunna platinametallen för 83 respektive 72 procent.

Katalysatorer används även i fordon, och det finns samarbeten mellan olika biltillverkare och återvinningsföretag som liknar exemplet med industriella katalysatorer ovan. Återvinningen av metaller från bilkatalysatorer är dock mer komplex och svårkontrollerad; katalysatorerna måste samlas in från ett stort antal användare och de flyttas till nya platser i samband med ägarbyten. Trots detta har de involverade aktörerna lyckats åstadkomma ökad återvinning av metaller från bilkatalysatorer, inte minst platinagruppens metaller, främst palladium och rodium, men även en handfull sällsynta jordartsmetaller. En viktig förutsättning för detta har varit dessa metallers höga ekonomiska värden. Detta gäller även guld och silver som, tillsammans med bland annat kobolt, molybden och mangan, kan återvinnas från exempelvis fordonens smörjmedel och olika magnetiska komponenter.¹⁶

¹⁶ Vid Bolidens smältverk i Rönnskär återvinns elektronikskrot (kretskort från datorer och mobiltelefoner), och även där är fokus på högvärdiga metaller såsom koppar och ädelmetaller

Ovan nämnda exempel illustrerar hur en ökad återvinning kan växa fram mer eller mindre på frivillig basis utifrån ömsesidigt fördelaktiga ekonomiska transaktioner mellan två eller flera företag (dvs B2B).¹⁷ Forskningsstudier visar att förutsättningarna för framväxten av innovativa affärsmodeller där olika företag samverkar kring metallåtervinning är speciellt gynnsamma om äganderätterna är väl definierade (och gärna oförändrade), samt om de transaktionskostnader som aktörerna möter är tillräckligt låga. I praktiken är detta ofta kopplat till geografisk närhet; flera studier betonar hur komplexa globala värdekedjor ökar transaktionskostnaderna för återvinning. I många situationer är det därför svårare för de inblandade parterna att internalisera de negativa externa effekterna kopplade till återvinningsbarhet; det gäller bl a metallåtervinning från olika produkter som ägs (eller har ägts) av privata konsumenter och dessutom bytt ägare över livscykeln.

Teknologiutvecklingen kan komma att förändra förutsättningarna för en mer marknadsdriven metallåtervinning och återvinningsbarhet. Ett exempel är att en ökad spårbarhet av material genom hela produktlivscykeln kan ge konsumenterna mer makt att driva igenom förändringar i produkters utformning. Avslutningsvis är det också viktigt att upprepa att vissa barriärer för ökad återvinning är svåra att hantera såväl politiskt som av företagen själva. Det har att göra med karaktären på metallmarknaderna där vissa metaller (inte minst de innovationskritiska) produceras som biprodukter, och utbudet av metallskrot begränsas av tidigare konsumtions- och investeringsmönster. Detta genererar i regel stora prisfluktuationer, som är svåra att hantera på ett effektivt sätt med hjälp av politiska styrmedel.

4.4 Kom ihåg att ibland utgör konventionell miljöpolitik den mest effektiva styrningen

Vi har ovan pekat på att flera av de styrmedel som idag dominerar dagens avfallspolitik – t ex deponiskatten och avfallförbränningsskatten – bygger på att det bedömts svårt att på ett träffsäkert sätt internalisera alla diffusa externa effekter som kan kopplas till olika avfallsströmmar. Detta ställer dock stora krav på avfallspolitiken; det blir viktigt att säkerställa att det återvunna alternativet inte innebär mer negativ miljöpåverkan än exempelvis deponi och förbränning. Att bestämma i vilka situationer undantag från avfallshierarkin är motiverad ur miljösynpunkt är ofta ingen enkel uppgift.

Det finns flertalet omständigheter som illustrerar denna komplexitet, samt behovet av att inte tillämpa avfallshierarkin för strikt. Studier har bland annat argumenterat för att styrmedel som styr bort från deponi även riskerar att styra bort metaller från den sekundära produktionen, och i Europa har

(silver, guld), medan teknologin inte gör det lönsamt att återvinna andra innovationskritiska metaller.

¹⁷ Erfarenheter finns även från andra industrier, t ex då återtillverkare redan under 1980-talet började sätta press på kopianorproducenten Xerox att börja återvinna uttjänta bläckpatroner. Företagets arbete med att åstadkomma detta inkluderade förändringar i produktens utformning.

återvinningsindustrin varnat för sådana utfall. Detta problem har uppmärksamats även i Sverige; metaller (t ex från bilar) hamnar i avfallsförbränningen och är därefter svåra att utvinna. Ett annat exempel handlar om existerande undantag från den svenska deponiskatten. Avfallet från gruvindustrin i Sverige står för en hög andel (cirka tre fjärdedelar) av den totala avfallsmängden (i ton), men denna avfallsfraktion är undantagen från deponiskatten. Forskare har argumenterat för att detta undantag snedvrider konkurrensen mellan primär och sekundär metallproduktion. Reducerade deponivolymer utgör dock inget självändamål; styrmedel som baseras på den s k avfallshierarkin bör ”härma” sådana styrmedel som mer direkt skulle kunna internalisera de negativa externa miljöeffekterna. I fallet med de stora mängderna gruvavfall – som mestadels består av bergrester – styr emellertid avfallshierarkin fel. Naturvårdsverket har konstaterat att i detta fall är ett undantag från deponiskatten motiverad utifrån miljöskäl.¹⁸

Även om avfallshierarkin ofta representerar en rimlig tumregel, som bidrar till en överlag lägre miljöpåverkan, existerar ofta svåra avvägningar. Detta innebär i sin tur att – i sådana fall där avfallshierarkin leder fel – bör politiken vara öppen för alternativa styrmedel. Dessa kan också vara relativt trubbiga men likväl mer träffsäkra än en strikt tillämpning av avfallshierarkin. Det kan exempelvis handla om teknikkrav, begränsningsvärden och/eller förbud för farliga ämnen i produkter. Förutsättningarna för en sådan alternativ politik kan förändras över tid,¹⁹ inte minst i takt med teknologisk utveckling, och en viktig roll för politiken kan – och bör – också handla om att stödja ny teknologi som gör det mer praktiskt och ekonomiskt möjligt att implementera en mer träffsäker miljöpolitik, t ex genom att kunna spåra och mäta förekomsten av kemikalier och andra farliga ämnen i produkter. Idag är det ofta oklart vilka incitament som existerar för ekonomins aktörer att investera i ny teknologi som underlättar miljöpolitikens genomförande, inklusive tillsynen.

Även alternativa styrmedel kan dock leda till svåra avvägningar, och incitamentsstrukturer som riskerar att leda fel. Den svenska kemikalieskatten på hemelektronik är ett intressant exempel. Syftet med skatten har bl a varit att minska förekomsten av farliga kemikalier i hemmiljöer men i praktiken är skatten en produktskatt; enda sättet för konsumenten att undvika kemikalierna är att inte köpa produkten överhuvudtaget. Skatten riskerar också att ge lägre andrahandsvärden på begagnad elektronik samt att mer elektronik skrotas och/eller säljs utomlands. Det är därför långt ifrån självklart att kemikalieskatten leder till en totalt sett lägre miljöpåverkan.

¹⁸ Naturvårdsverket motiverar detta med att konstatera att de stora volymerna bergrester genereras i norra Sverige där gruvorna finns men avsättningsmarknaden för dessa restprodukter finns i huvudsak i söder. Eftersom transport på järnväg är begränsad befaras det att en deponiskatt skulle leda till att transporten skulle ske med miljömässigt sämre alternativ. Deponeering sker dessutom i princip uteslutande i anslutning till gruvorna, och bedöms bl a därför vara en miljömässigt lämplig lösning.

¹⁹ Den miljöavgift som Sverige idag lägger på utsläppen av kväveoxidutsläpp från energipannor blev t ex möjlig först då teknologi utvecklades för att mäta kväveoxidhalten i pannornas rökgaser.

Såsom påpekas i avsnitt 3.2 finns det även politiska hinder för införandet av t ex en mer effektiv klimatpolitik, framförallt på global nivå. Sekundär metallproduktion har överlag tydliga klimatfördelar jämfört med primär produktion. Att åstadkomma en global prissättning på koldioxid skulle därför innebära en tydligt ökad konkurrenskraft för den sekundära metallproduktionen, men en sådan global politik har visat sig svår att driva igenom. Studier visar dessutom att de globala subventionerna till fossilbaserade industrier har varit – och fortfarande är – betydande. Detta gäller framförallt om hänsyn tas till inte bara de direkta subventionerna utan även till indirekta subventioner i form av skattnedsättningar som fossilindustrin i många länder gynnas av. Internationella valutafonden (IMF) argumenterar exempelvis för att en effektiv prissättning av fossila bränslen skulle leda till 50-procentiga ökningarna i priserna på petroleumprodukter och naturgas. Detta illustrerar hur en viktig roll för staten är att verka för en effektiv prissättning av koldioxid på internationell nivå, t ex på det sätt som den svenska regeringen drivit på införandet av den s k marknadsstabilitetsreserven i det europeiska utsläppshandelssystemet EU ETS, samt avskaffandet av olika direkta och indirekta subventioner, inklusive nationella nedsättningar av koldioxidskatter. Sådana politiska åtgärder underlättar den globala klimatomställningen, men ökar även lönsamheten i investeringar för återvinning av innovationskritiska metaller.

4.5 Bidra till utvecklingen av ny återvinningsteknologi genom riktade styrmedel

Motiven till att stödja en hållbar teknologikutveckling och främja framväxten av ny industri och nya värdekedjor handlar bl a om förekomsten av höga investeringsrisker och kunskapsläckage, och i metallproduktionen är dessa marknadsmisslyckanden överlag frekvent förekommande. I detta avsnitt diskuteras kort vilken styrmedelskombination som kan behövas för att stimulera teknologisk utveckling; fokus är på områden där denna utveckling är transformativ och radikal, och således hänger ihop med framväxten av nya aktörsnätverk och värdekedjor samt inbegriper institutionell förändring. Det bör samtidigt påpekas att en riktad teknikpolitik innebär en rad svåra avvägningar, bland annat kopplat till vilka specifika teknikfält och teknologier som ett land (t ex Sverige) eller en region (t ex EU) skulle kunna satsa på givet vad som redan görs i andra delar av världen. Ambitionen i detta avsnitt är därför i första hand att peka ut den generella inriktningen på en sådan teknikpolitik snarare än att ge rekommendationer rörande specifika styrmedelsval.

Det går att identifiera tre övergripande områden där staten potentiellt kan spela en viktig roll för att stödja utvecklingen av ny återvinningsteknologi. För det första behövs *teknikstödjande styrmedel* för att stimulera grundläggande kunskapsutveckling, t ex i form av forskningsstöd till universitet och institut samt via skattelättnader för privat FoU. Forskningen visar att det ofta är en fördel för metallåtervinningen att – som Sverige – ha tillgång till bred expertis inom den primära produktionen, t ex inom processmetallurgi. Olika aktörer,

t.ex. Sveriges geologiska undersökningar (SGU) har dock pekat på att det även kan behövas ny tvärvetenskaplig kompetens i form av samarbeten mellan t ex geologer och olika materialforskare. De teknikstödande styrmedlen inbegriper även (del)finansiering av olika pilot- och demonstrationsanläggningar. Ett viktigt syfte med sådana anläggningar är att verifiera, testa och optimera den nya teknologin, samt att undersöka hur den fungerar vid produktion i full skala.

Forskningen har framhållit att pilot- och demonstrationsanläggningar spelar en speciellt viktig roll för att främja den teknologiska utvecklingen rörande återvinningen av innovationskritiska metaller. Ett aktuellt exempel är Northvolts utvecklingsarbete kring återvinning av litium från batterier, och där nu en större pilotanläggning planeras för att undersöka förutsättningarna för att skala upp den aktuella processen. Internationellt finns ett flertal exempel, t.ex i Tyskland kopplat till återvinning av sällsynta jordartsmetaller från skriv- och läsplattor.

För det andra behövs *marknadsdrivande styrmedel* för att bidra till marknadsformering, dvs stödja lärandet i produktion och användning av ny teknologi genom att skapa en efterfrågan på, och om nödvändigt en nischmarknad för, denna. Såsom påpekas ovan kan detta åstadkommas genom de traditionella avfallspolitiska styrmedlen, t ex producentansvar och pantsystem, men för vissa nya teknologier kan det krävas ett mer riktat stöd. Marknader för nya teknologier växer inte alltid fram spontant utan dessa skapas i ett samspel mellan aktörer med olika kompetens, etc., och ibland behövs därför specifika, temporära stöd i form av t ex investeringssubventioner, prispremier eller kvotplikter.

Kvotplikter, som i Sverige idag finns både inom t ex elproduktionen (i form av elcertifikat) och transportsektorn (i form av inblandningskrav för biodrivmedel), diskuteras alltmer frekvent i anslutning till cirkulära lösningar, t ex i den svenska handlingsplanen för en cirkulär ekonomi. Ett konkret exempel är återvinningscertifikat, som innebär att de som använder ett visst återvunnet material i tillverkningen av nya produkter kan få certifikat motsvarande den mängd återvunna material som man använt. Certifikaten kan sedan handlas på en marknad. Efterfrågan på certifikaten säkerställs genom att myndigheterna fastställer en kvotplikt på användarsidan som anger hur hög andel av den totala materialanvändningen som ska baseras på återvunnet material. Företag som har svårt att leva upp till den fastställda kvotplikten kan köpa certifikat från andra användare. En nackdel med dessa system är dock att kostnaden för att uppfylla målet är osäker och svår att förutsäga. Eftersom utbudet av återvunnet material ofta är prisökansligt skulle priserna på certifikaten kunna tvingas upp till mycket höga nivåer för att en ambitiös kvotplikt ska kunna uppfyllas.²⁰ Kvotplikter är framförallt samhällsekonomiskt motiverade i situationer där utbudet av återvunnet material är känsligt för prisförändringar samt där miljö-

²⁰ För att adressera detta kan man införa en fast avgift som betalas av de som inte har tillräckligt många certifikat (ett pristak). Detta skapar en möjlighet att köpa sig fri från plikten att köpa certifikat, och på så sätt inför man en maxgräns för priset på certifikaten. Det går givetvis även att införa ett prisgolv, som garanterar att systemet skapar tillräckliga incitament även om kostnaderna för metallåtervinning faller över tid.

vinsterna av att återvinna uppvisar tydliga tröskeleffekter. Dessa förutsättningar är dock normalt sett inte uppfyllda på avfallsområdet.

Forskningen har även framhållit hur offentlig upphandling kan utgöra ett potentiellt effektivt marknadsdrivande styrmedel. Det finns dock utmaningar kopplat till en sådan form av politisk styrning. Syftet med marknadsdrivande styrmedel är att skapa ett lärande i produktionen samt användningen av ny återvinningsteknologi, och detta skapas bäst om den offentliga sektorn står för en stor andel av den relevanta marknaden, t ex specifika produkter där olika metaller ingår. Det är också viktigt att det lärande som genereras av en ökad användning och produktion av ny teknologi inte sker isolerat från de insatser som görs i form av olika teknikstödjande styrmedel.

För det tredje kan staten även behöva använda sig av s k *systemövergripande styrmedel* för att stödja olika former av generella funktioner i innovationssystemet, t ex kompletterande åtgärder som syftar till att stärka de aktörsnätverk som behövs för att stödja den nya tekniken (s k *nätverksstyrning*). Detta kan bl a handla om skapandet av nya plattformar för aktörssamverkan, samt om olika organisatoriska lösningar (inklusive hur olika företags anspråk på immateriella rättigheter ska hanteras).

En framgångsrik teknologisk utveckling för ökad metallåtervinning behöver bygga på nya aktörsnätverk längs hela produktkedjan, t ex ett ökat samarbete mellan materialforskare och de ingenjörer som utformar motorsystemen i nya fordon. Staten kan potentiellt spela en viktig roll för att stimulera ett sådant samarbete; i Sverige skulle detta kunna ske inom ramen för det så kallade strategiska innovationsprogrammen (t ex Re-Source och Swedish Mining Innovation). I Japan har METI (landets industridepartement) verkat för att stimulera regelbundna möten mellan tillverkningsindustrin och återvinningsföretagen för att resonera kring produktdesign för ökad återvinningsbarhet.

Forskning om återvinning från uttjänta fordon och elektronikskrot har pekat på hur det svenska innovationssystemet skulle kunna stärkas på en rad punkter. Det handlar bland annat om att stärka kompetensuppbyggnaden, både genom stöd till FoU och pilotanläggningar, men även genom att erbjuda fördelaktiga lån i form av t ex statliga kreditgarantier. Det är även viktigt med ett tydligt ansvarstagande och en transparens från statens håll, t ex i form av visioner, en tydlig riktning (för de relevanta myndigheternas insatser), och att inte ”gömma” de teknik- och industripolitiska målen i den generella miljö- och klimatpolitiken. Vissa har även pekat på ett behov av att inrätta en separat myndighet med utpekat ansvar för materialeffektivisering.

En vanlig kritik mot en aktiv – riktad – teknikpolitik är att moderna stater inte är väl utrustade för en sådan, inte minst då det gäller att peka ut relevanta teknologier. I praktiken behöver dock politiken bygga på såväl teknikneutrala som tekniks specifika styrmedel, och där beslut kring politikens utformning och implementering inte ska ske oberoende av all den kompetens och erfarenhet som finns i den berörda industrin. Detta är nödvändigt för att kunna överbrygga det kunskapsglapp som normalt finns mellan industri och stat, inte minst rörande frågan kring vilka centrala teknikutvecklingsspår som är mest

intressanta. Å ena sidan måste staten vara autonom och stå upp för samhällsintresset men å andra sidan är det viktigt att skapa stort utrymme för kunskapsöverföring från industrin utan att industrin tar över (kidnappar) policyutformningen.

De tekniskspecifika insatserna bör bygga på en samfinansiering mellan industri och stat. När det gäller den tekniska utvecklingen inom metallåtervinningsområdet är det sannolikt mest relevantt att EU – snarare än Sverige – utgör utgångspunkten för en sådan aktiv teknikpolitik, men där Sverige likväl kan identifiera viktiga nischer som landet tar ett extra ansvar för (t.ex. återvinning från gruvavfall). Detta – i kombination med samarbeten med länder även utanför EU – ökar möjligheterna att åstadkomma ett mer omfattande kunskapsutbyte längs produktkedjorna. En av de absolut största utmaningarna kopplat till att åstadkomma en ökad återvinning av såväl bulk- som innovationskritiska metaller är förbättrad produktdesign och ny teknologi för ökad återvinningsbarhet.

5. Behov av fortsatt lärande

Det huvudsakliga syftet med denna rapport har varit att – med utgångspunkt i tidigare forskning – identifiera och diskutera olika typer av barriärer för ökad återvinning av innovationskritiska metaller, samt redogöra för några viktiga lärdomar för utformningen av politiska styrmedel som kan främja återvinningen av dessa metaller. Vi har fokuserat på olika marknadsmisslyckanden som kan motverka en ökad metallåtervinning, och framväxten av nya marknader för återvunnen metall där sådana inte finns idag.

En viktig lärdom från sammanställningen är att utsikterna för en ökad återvinning skiljer sig åt mellan metaller och inte minst mellan olika produkter. Vissa marknadsmisslyckanden är därför sannolikt mer framträdande i vissa fall jämfört med andra; detta blir extra tydligt då vi jämför förutsättningarna för återvinning mellan bulkmetaller och innovationskritiska metaller, men det finns även sannolikt stora skillnader mellan de olika innovationskritiska metallerna. En viktig uppgift för det framtida lärandet är därför att genomföra fallstudier av förutsättningarna för framväxten av mer effektiva marknader för olika metaller. Vilka marknadsmisslyckanden och institutionella barriärer finns i de olika specifika fallen (metaller och produkter), och hur ser förutsättningarna ut för att adressera dessa, antingen på frivillig väg av marknadens aktörer eller via politisk styrning?

En potentiellt intressant fallstudie är att ta avstamp i Tillväxtanalys undersökningar av olika värdekedjor för innovationskritiska metaller, t ex kopplat till litium-jon batterier. Dessa studier fokuserar i första hand på förutsättningarna för primär produktion (i Sverige), men skulle kunna breddas och även analysera förutsättningarna för återvinning av innovationskritiska metaller. En viktig satsning i detta sammanhang är batteriföretaget Northvolts arbete med att utveckla en hydrometallurgisk process för återvinning av litium från batterier. I en ny anläggning (den s k Revolt Ett) som planeras i Skellefteå ska

företaget säkerställa att denna process även fungerar i stor skala. En annan intressant fallstudie är återvinning av sällsynta jordartsmetaller samt andra material från gruvavfall (se ovan om LKAB:s utvecklingsprojekt ReeMAP).

Ett annat område för fortsatt lärande handlar om att dra lärdom av olika initiativ och styrmedel i andra länder. Vi har ovan konstaterat att det idag finns få utvärderingar av de – än så länge relativt få – styrmedel som syftar till ökad återvinning av innovationskritiska metaller. Svenska myndigheter (t ex Tillväxtanalys) har kartlagt vilka politiska initiativ som olika länder har tagit på detta område, men det är nu viktigt att ta nästa steg och öka kunskapen om vilka specifika effekter som dessa initiativ och styrmedel har haft. Denna rapport har bidragit med ett analytiskt ramverk – ett sätt att tänka kring barriärer och styrmedel – som tillsammans med annan kunskap kan utgöra en relevant utgångspunkt för sådana fördjupade studier.

Relevant litteratur för fördjupade studier

Andersson, M., M. Ljunggren Söderman, och B. Sandén (2019). Challenges of recycling multiple scarce metals: the case of Swedish ELV and WEEE recycling. *Resources Policy* 63, Artikel 101403.

Denna artikel beskriver förutsättningar och barriärer för återvinning av innovationskritiska metaller från uttjänta fordon och elektronik i Sverige. Analysen identifierar och resonerar kring viktiga barriärer med utgångspunkt i en innovationssystemansats, och diskuterar även några lärdomar för politiken.

Andersson, M., M. Ljunggren Söderman, och B. Sandén (2017). Lessons from a century of innovating car recycling value chains. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 25, 142–157.

Artikeln beskriver hur innovationssystemet kring stålåtervinning från uttjänta bilar har växt fram i Sverige under 100 år, och belyser vilka funktioner som varit viktiga för att utveckla detta system i olika faser. Utgångspunkten är att denna historia kan bidra med viktiga insikter för hur motsvarande system kan växa fram – och stödjas – även för andra metaller, exempelvis de innovationskritiska.

Compañero, R. J., A. Feldmann, och A. Tilliander (2021). Circular steel: how information and actor incentives impact the recyclability of scrap. *Journal of Sustainable Metallurgy* 7, 1654-1670.

Denna nya artikel innehåller en ingående analys av den svenska stålskrotmarknaden, och med fokus på betydelsen av information kopplat till skrotkvalitet. Analysen bygger bl a på intervjuer med relevanta aktörer på marknaden.

European Rare Earths Competency Network (ERECON) (2015). *Strengthening the European Rare Earths Supply-chain: Challenges and Policy Options*, Bryssel.

Denna rapport handlar om hur Europas behov av sällsynta jordartsmetaller ska kunna säkras, vilka utmaningar som finns samt hur politiken kan bidra för att överkomma dessa. Fokus ligger både på primär och sekundär produktion av sällsynta jordartsmetaller.

Gaustad, G., M. Krystofik, M. Bustamente, och K. Badami (2018). Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling* 135, 24-33.

Denna artikel baseras på en genomgång av forskningslitteraturen samt egna fallstudier, och innehåller en analys av hur företag kan använda olika cirkulära lösningar för att reducera de risker som finns kring utbudet av kritiska metaller.

Johansson, N. (2016). *Landfill Mining: Institutional Challenges for the Implementation of resource extraction from waste deposits*. Doktorsavhandling, Linköpings universitet.

I denna doktorsavhandling undersöks de institutionella förutsättningarna för ökad utvinning av resurser från deponier, inklusive gruvavfall. Författaren argumenterar för att de institutionella villkoren tenderar att snedvrider incitamenten i valet mellan återvinning och gruvbrytning, till förmån för det senare.

Ljunggren Söderman, M., och E. Ingemarsdotter (2014). *Användning och återvinning av potentiellt kritiska material*. Kunskapsöversikt. Rapport 2014:20, Chalmers tekniska högskola.

Denna rapport innehåller en kunskapssammanställning rörande: (a) användningen av olika kritiska material i olika produkter och ekonomiska sektorer; samt (b) de befintliga återvinnings-möjligheterna för de olika materialen. Sammanställningen innehåller information om 41 olika material, som SGU samt Naturvårdsverket pekat ut som potentiellt "kritiska".

Nassar, N. T., T. E. Graedel, och E. M. Harper (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances* 1, Artikel 1400180.

Artikeln beskriver hur den (framförallt) primära produktionen av många innovationskritiska metaller produceras som biprodukter till andra metaller och mineral, vilket leder till ett utbud som är prisokänsligt och även tenderar att bidra till kraftiga prissvängningar på dessa metaller.

Nicolli, F., N. Johnstone, och P. Söderholm (2012). Resolving failures in recycling markets: the role of technological innovation. *Environmental Economics and Policy Studies* 14(3), 261-288.

Artikeln diskuterar och exemplifierar ett antal marknadsmisslyckanden som riskerar att hämma framväxten av effektiva marknader för återvunna material, och undersöker hur olika styrmedel inom EU och dess medlemsländer har påverkat teknologisk innovation för att överkomma dessa misslyckanden. Den empiriska analysen fokuserar bl a på återvinning från uttjänta fordon.

Palmer, K., och M. Walls (1999). *Extended Product Responsibility: An Economic Assessment of Alternative Policies*, Discussion Paper 99-12, Resources for the Future, Washington, D.C.

En kort och enkel diskussion om fördelarna med producentansvaret ur ett incitamentsperspektiv samt hur andra (kombinationer av) styrmedel kan generera liknanden incitament.

Punkinen, H., U-M. Mroueh, M. Wahlström, L. Youhanan, och Å. Stenmarck (2017). *Critical metals in end-of-life products. Recovery potential and opportunities for removal of bottlenecks of recycling*. TemaNord 2017:531, Nordiska Ministerrådet, Köpenhamn.

Rapporten syftar till att analysera hinder för återvinning innovationskritiska metaller, samt att identifiera potentiella styrmedel som kan överbrygga barriärerna för ökad återvinning. Fokus är uttjänta fordon, belysningsprodukter, elektronik och laddningsbara batterier i de nordiska länderna.

Söderholm, P. (2021). *Metallåtervinningens ekonomiska marknader: komplexitet, incitament och politisk styrning*. Kommande rapport på Tillväxtanalys, Östersund.

Rapporten presenterar en konceptuell analys av marknaderna för återvunna metaller, och hur dessa marknaders funktionssätt påverkar konkurrensen mellan primär och sekundär metallproduktion. Framförallt diskuteras olika typer av marknadsmisslyckanden och barriärer som kan motverka framväxten av effektivare återvinningsmarknader, både gällande bulkmetaller och de innovationskritiska metallerna. Den föreliggande rapporten till Riksdagsförvaltningen baseras på denna mer detaljerade rapport, men innehåller även en mer fördjupad diskussion om viktiga vägval för den politiska styrningen på området samt har ett mer utpräglat fokus på de innovationskritiska metallerna.

Tillväxtanalys (2015). *Innovativ metallåtervinning för ökad resurseffektivitet*. PM 2015:10, Östersund.

Rapporten beskriver policyinitiativ i olika länder som syftar till att öka återvinningen av innovationskritiska metaller. En bred palett av politiska åtgärder tas upp, och fokus ligger på EU (generellt), Tyskland, Japan, USA, Kina och – i viss mån – ett antal andra EU-länder. Studien kommenterar även kort vilka effekter en del av dessa åtgärder och styrmedel har haft.

Tillväxtanalys (2021). *Marknadsbarriärer för återvinning av metaller. En omvärldsanalys av vad som hindrar och främjar konkurrensen mellan utvinnings- och återvinningsindustrin*. Rapport AU 2022:03:01, Östersund.

Denna rapport innehåller en internationell utblick för att kartlägga vad som hindrar och främjar konkurrensen mellan primär och sekundär produktion av metaller. Fokus är både på bulkmetaller (stål, koppar, nickel och aluminium) samt innovationskritiska metaller (grafit, litium, kobolt och sällsynta jordartsmetaller).

UNEP (2013). *Metal recycling: opportunities, limits, infrastructure – A report of the working group on the global metal flows to the International Resource Panel*. United Nations Environment Program, Paris.

Denna omfattande rapport diskuterar förutsättningarna för att öka återvinningen av metaller, och argumenterar starkt för att framtida åtgärder och

politik bör bygga på ett produktfokus. Studien är rik på detaljer kring drivkrafter och barriärer före metallåtervinning, och erbjuder en rik flora av exempel från olika metaller (inklusive de innovationskritiska).

2019/20:RFR1	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om den aktuella penningpolitiken den 24 september 2019
2019/20:RFR2	UTBILDNINGSPOLITISKA UTSKOTTET Seminarium om livslångt lärande
2019/20:RFR3	KULTURUTSKOTTET Att redovisa resultat
2019/20:RFR4	UTBILDNINGSPOLITISKA UTSKOTTET Regeringens resultatredovisning för UO15 och UO16 – utbildningsutskottets uppföljningar 2012–2018
2019/20:RFR5	FINANSUTSKOTTET Hur påverkas den finansiella stabiliteten av cyberhot, fintech och klimatförändringar? En översikt av forskning, aktörer och initiativ
2019/20:RFR6	NÄRINGSUTSKOTTET Uppföljning av beslutet att bilda Sveriges export- och investeringsråd
2019/20:RFR7	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om finansiell stabilitet den 29 januari 2020. Fintech och cyberhot – Hur påverkas den finansiella stabiliteten?
2019/20:RFR8	ARBETSMARKNADSPOLITISKA UTSKOTTET, KULTURUTSKOTTET, SOCIALFÖRSÄKRINGSPOLITISKA UTSKOTTET, SOCIALUTSKOTTET, UTBILDNINGSPOLITISKA UTSKOTTET Offentlig utfrågning på temat psykisk hälsa i ett Agenda 2030-perspektiv
2019/20:RFR9	UTBILDNINGSPOLITISKA UTSKOTTET Öppen utfrågning inför den forskningspolitiska propositionen
2019/20:RFR10	TRAFIKUTSKOTTET Mobilitet på landsbygder – forskningsöversikt och nulägesbeskrivning
2019/20:RFR:11	KONSTITUTIONSPOLITISKA UTSKOTTET Forskarhearing om den representativa demokratis utmaningar i polariseringens tid
2019/20:RFR:12	CIVILUTSKOTTET Civilutskottets offentliga utfrågning om överskuldssättning
2019/20:RFR:13	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om den aktuella penningpolitiken 10 mars 2020

2020/21:RFR1	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om den aktuella penningpolitiken den 20 oktober 2020
2020/21:RFR2	SOCIALFÖRSÅKRINGSUTSKOTTET Uppföljning av tillämpningen av gymnasireglerna
2020/21:RFR3	NÄRINGSUTSKOTTET Sveaskogs samhällsuppdrag om markförsäljning – en uppföljning
2020/21:RFR4	NÄRINGSUTSKOTTET Artificiell intelligens – Möjligheter och utmaningar för Sverige och svenska företag
2020/21:RFR5	TRAFIKUTSKOTTET Punktlighet för persontrafik på järnväg – en uppföljning
2020/21:RFR6	SOCIALFÖRSÅKRINGSUTSKOTTET Digitalt seminarium om uppföljningen av tillämpningen av gymnasireglerna den 26 november 2020
2020/21:RFR7	MILJÖ- OCH JORDBRUKSUTSKOTTET Lantbrukets sårbarhet – en uppföljning
2020/21:RFR8	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om finansiell stabilitet – Risker i kölvattnet efter covid19-pandemin
2020/21:RFR9	SOCIALUTSKOTTET Digital offentlig utfrågning med anledning av Coronakommissionens delbetänkande om äldreomsorgen under pandemin
2020/21:RFR10	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om den aktuella penningpolitiken den 16 mars 2021
2020/21:RFR11	CIVILUTSKOTTET Uppföljning av lagen om kollektivtrafikresenärers rättigheter – hur har lagen fungerat för resenärerna?
2020/21:RFR12	TRAFIKUTSKOTTET Offentlig utfrågning om järnvägens punktlighet
2020/21:RFR13	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om Riksbankens rapport Redogörelse för penningpolitiken 2020
2020/21:RFR14	MILJÖ- OCH JORDBRUKSUTSKOTTET Offentlig utfrågning om rapporten Lantbrukets sårbarhet – en uppföljning
2020/21:RFR15	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om Finanspolitiska rådets rapport Svensk finanspolitik 2021
2020/21:RFR16	SOCIALUTSKOTTET Digital offentlig utfrågning om sjukdomen ME/CFS och infektionsutlöst trötthetssyndrom
2020/21:RFR17	KONSTITUTIONSUTSKOTTET Nyheter i sociala medier – en forskningsöversikt av användning och effekter ur ett medborgarperspektiv

2021/22:RFR1	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om den aktuella penningpolitiken den 19 oktober 2021
2021/22:RFR2	SOCIALUTSKOTTET Socialutskottets offentliga utfrågning om precisionsmedicin
2021/22:RFR3	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om finansiell stabilitet – Sårbarheter och motståndskraft i ekonomin i ljuset av ökande skulder hos hushåll och kommersiella fastighetsföretag
2021/22:RFR4	FINANSUTSKOTTET Utvärdering av Riksbankens penningpolitik 2015–2020
2021/22:RFR5	FINANSUTSKOTTET Evaluation of the Riksbank's Monetary Policy 2015–2020
2021/22:RFR6	FINANSUTSKOTTET Öppen utfrågning om den aktuella penningpolitiken den 3 mars 2022
2021/22:RFR7	ARBETSMARKNADSUTSKOTTET Uppföljning av nyanländas etablering –arbetsmarknadsstatus med särskilt fokus på kvinnorna
2021/22:RFR8	KONSTITUTIONSUTSKOTTET Uppföljning och utvärdering av tillämpningen av utskottsinitiativ
2021/22:RFR9	KULTURUTSKOTTET Uppföljning av delar av den svenska friluftslivspolitiken