Flöden av sekundära kritiska råmaterial i den svenska teknosfären

Erik Lindblom, Henric Lassesson, Erik Emilsson, Amanda Hedenborg &
Hannes Waldetoft, IVL Svenska Miljöinstitutet

Avtal: A21-15

På uppdrag av Naturvårdsverket

Publicering: www.smed.se

Utgivare: Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut

Adress: 601 76 Norrköping

Startår: 2006

ISSN: 1653–8102

IVL Rapport nr: C748, ISBN: 978-91-7883-482-2

SMED utgör en förkortning för Svenska MiljöEmissionsData, som är ett samarbete mellan IVL Svenska Miljöinstitutet, Statistikmyndigheten SCB, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) och Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI). Samarbetet inom SMED inleddes 2001 med syftet att långsiktigt samla och utveckla den svenska kompetensen inom emissionsstatistik kopplat till åtgärdsarbete. På uppdrag av Naturvårdsverket samt Havs- och vattenmyndigheten säkerställer SMED framtagandet av underlag till Sveriges internationella rapportering avseende utsläpp till luft och vatten, avfall, farliga ämnen, buller samt åtgärder. Syftet med SMED-samarbetet är främst att utveckla och driva nationella emissionsdatabaser, samt att tillhandahålla olika tjänster relaterade till dessa för nationella, regionala och lokala myndigheter. Mer information finns på SMED:s webbplats www.smed.se.

Innehåll

INNEHÅLL 4

ORDLISTA OCH FÖRKORTNINGAR 6

SAMMANFATTNING 9

Kartläggning av sekundära flöden av kritiska råmaterial 10

Utformning av spårbarhetssystem för ökad cirkularitet 12

Metod samt datatillgång inför kommande kartläggningar 14

INLEDNING 16

Syfte och mål 16

Bakgrund 16

MATERIAL OCH METOD 18

Avgränsning av studerade materialflöden 18

Litteraturstudie 19

Statistikgenomgång 20

Beräkningar 21

Prioritering av studerade ämnen 22

RESULTAT OCH DISKUSSION 24

Kartläggning av sekundära flöden av kritiska råmaterial 24

Generella observationer 24

Återvinning 26

Identifierade nyckelaktörer 28

Kvantitativa skattningar för kobolt 34

Kvantitativa skattningar för platinagruppmetaller 39

Kvantitativa skattningar för neodym 47

Kvantitativa skattningar för indium 52

Utformning av spårbarhetssystem för ökad cirkularitet 55

Förutsättningar och framgångsfaktorer 57

Aktörer och drivkrafter 59

Systemdesign 62
Hinder och utmaningar 66
Rekommendationer för fortsatt arbete 69
Metod för kommande kartläggningar 71
SAMLAD DISKUSSION OCH SLUTSATSER 75
Likheter och skillnader mellan sekundära flöden av fyra olika kritiska råmaterial 75
Kriterier för en funktionell återvinning 77
Spårbarhetssystem kan stimulera ökad återvinning 78
Framtida kartläggningar skulle underlättas av förfinad avfallsrapportering och intervjuer med nyckelaktörer 79
REFERENSER 80

Ordlista och förkortningar

BEV	Helelektriskt fordon, utan förbränningsmotor. (*Battery Electric Vehicle*)
Blydross	En samling av fasta föroreningar som flyter ovanpå det smälta blyet vid blyproduktion eller -återvinning. Materialet skrapas av från smältan och kan raffineras ytterligare om det innehåller ämnen som är värda att utvinna.
CFL	Lågenergilampor av lysrörstyp (*Compact Fluorescent Light*)
Chain of custody (CoC)	Den kronologiska dokumentation som registrerar sekvensen av utfärdande, kontroll, överföring och lagring av fysisk eller elektronisk bevisning/certifikat (Tillväxtanalys, 2019). I vissa sammanhang används spårbarhetskedja som svensk översättning.
CIGS	En typ av tunnfilmssolceller bestående av en kombination av koppar, indium, gallium och selen.
Cirkulär lönsamhet	En produkts lönsamhet sett över hela livscykeln eller rentav flera livscykler. Påminner om begreppet *life-cycle profit* men avser särskilt cirkulära affärsmodeller.
Downcycling	Ett material med hög renhet återvinns till ett nytt material med lägre renhet. Dess specifika egenskaper går delvis förlorade. Exempel är stål som smälts om till armeringsjärn. Se även icke-funktionell återvinning.
EPD	Miljövarudeklaration är ett oberoende verifierat dokument som ger transparant och jämförbar information om produkters och tjänsters miljöpåverkan. (*Environmental Product Declaration*).
Fraggskrot	Metaller som har sorterats ut efter fragmentering av avfall innehållandes stor del metall, exempelvis uttjänta fordon.
Funktionell återvinning	Vid funktionell återvinning behålls de fysiska och kemiska egenskaperna som ett material ursprungligen designades för och används på nytt.
HEV	Hybridfordon, utan möjlighet att ladda från elnätet (*Hybrid Electric Vehicle*)

Icke-funktionell återvinning	Icke-funktionell återvinning resulterar i ett fullt användbart, men nedgraderat material, där de ursprungliga egenskaperna förlorats.
Kritiska råmaterial	De material som bedöms vara nödvändiga för att genomföra klimatomställningen till ett hållbart samhälle. Vanligtvis syftar det på förteckningen över i dagsläget de trettio råmaterial som EU anser har avgörande betydelse för ekonomisk återhämtning och långsiktig omställning i linje med den gröna given, kommissionens handlingsplan för cirkulär ekonomi och EU:s industristrategi.
LED-lampor	Lysdiodslampor (*Light Emitting Diode*)
Li-jon	Litiumjonbatteri, finns med ett flertal olika batterikemier där sammansättningen ofta skrivs med tre bokstäver (exempelvis LCO = litium-koboltoxid, NMC = nickel-mangan-kobolt) och ibland med tre siffror för att beskriva förhållandet mellan ämnena (exempelvis NMC 622 = 60 % nickel, 20 % mangan, 20 % kobolt).
NdFeB	Neodymmagnet, en stark permanentmagnet bestående av en legering av neodym, järn och bor.
NiMH	Nickelmetallhydridbatteri, ett laddbart batteri som förutom nickel även innehåller flera sällsynta jordartsmetaller och kobolt.
PGM	Platinametaller (*Platinum Group Metals*).
PHEV	Laddhybrid (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*).
Platinagruppmetaller	Samlingsnamn för metallerna platina (Pt), palladium (Pd), rodium (Rh), rutenium (Ru), iridium (Ir) och osmium (Os). Förkortas till PGM (*Platinum Group Metals*).
Primära råmaterial	Ett råmaterial avsett för tillverkning eller användning, framtaget genom utvinning av en naturresurs (primär resurs). Se även sekundära råmaterial.
Reduktionsmedel	Ett ämne som används för att reducera ett annat ämne, exempelvis för att framställa en metall från en metalloxid.
REE	Sällsynta jordartsmetaller (*Rare Earth Elements*).
Sekundära flöden	Flöden av råmaterial som kan vara önskvärda att återvinna som sekundära råmaterial.

Sekundära råmaterial	Ett råmaterial avsett för tillverkning eller användning, framtaget genom återvinning, sekundär utvinning eller återanvändning, det vill säga en returråvara. Det kan vara antingen ett avfall, en biprodukt eller en produkt.
Sällsynta jordartsmetaller	En grupp av 17 grundämnen där skandium, yttrium och de 15 lantanoiderna ingår. Lantanoiderna är: lantan, cerium, praseodym, neodym, prometium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium och lutetium. Delas ibland in i lätta respektive tunga.
Termiskt interfacematerial	Ett värmeledande material som sluter tätt mellan komponenten som behöver kylas ner och kylprofilen. Används bland annat i elektronik, till exempel för att förbättra kylningen av processorer och andra komponenter som behöver kylas.
Återvinningsgrad	Den sammanlagda verkningsgraden av insamling, sortering, demontering, förbehandling, och materialåtervinning.

Sammanfattning

SMED utgör en förkortning för Svenska MiljöEmissionsData, som är ett samarbete mellan IVL, SCB, SLU och SMHI.

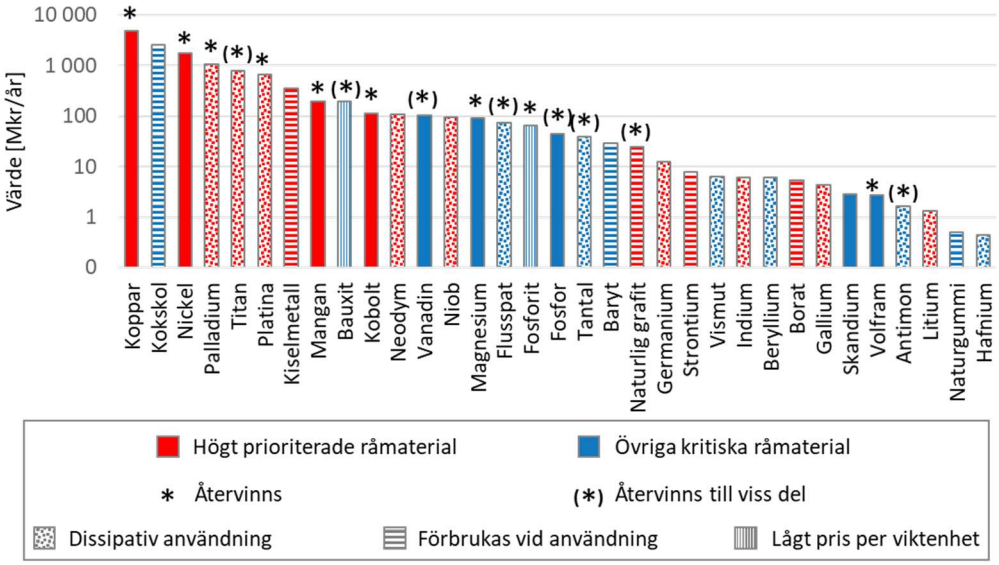
För att uppfylla åtagandena i Parisavtalet krävs en mycket omfattande omställning av världens energi- och transportsystem. De klimatvänliga energiteknikerna – vindkraftverk, solceller och elfordonsbatterier – kommer att kräva mycket stora mängder av både basmetaller och sällsynta jordartsmetaller. Europeiska kommissionen ser vart tredje år över vilka ämnen som är av avgörande betydelse för den gröna omställningen. Gemensamt är att ämnena både är av stor ekonomisk betydelse och att EU:s tillgång till ämnena är begränsad eller sårbar. Den senaste listan från 2020 består av 27 enskilda ämnen och 3 ämnesgrupper (totalt 49 ämnen). Hållbar utvinning och återvinning av sekundära råmaterial är ett växande komplement till brytning av primära mineralresurser. Enligt Sveriges strategi för en cirkulär ekonomi ska primära råmaterial så långt det är möjligt ersättas av resurser som används effektivt i cirkulära flöden. Regeringen har därför gett SGU och Naturvårdsverket i uppdrag att arbeta för att öka möjligheterna till hållbar utvinning av mineral och metaller från sekundära flöden.

Den här studien syftar till att öka kunskapsunderlaget inom det uppdraget. Studien består av de tre delarna 1) kartläggning av sekundära flöden av kritiska råmaterial i den svenska teknosfären, 2) beskrivning av förutsättningar, möjligheter och utmaningar med olika typer av spårbarhetssystem för ökad cirkularitet samt 3) utveckling av en metod, inklusive beskrivning av datatillgång, inför kommande fördjupade eller kompletterande kartläggningar. Kartläggningen har avgränsats till de flöden där de studerade råmaterialen har passerat en användarfas innan de blir avfall och eventuellt går till återvinning. Avfall från gruvor och tillverkningsindustri ingår inte.

En övergripande slutsats är att det saknas statistik för metallanvändning i Sverige. För kritiska råmaterial saknas dessutom tillförlitliga uppgifter på koncentrationer av kritiska råmaterial i produkter och uppgifterna är än bristfälligare för avfallsflödena. Den statistik som finns beskriver främst produktion, import och export av basmetallerna och avfall för olika produktkategorier. Det innebar att den ursprungliga arbetsgången med en inledande litteraturstudie följd av en statistikgenomgång för att sammanställa ett enhetligt underlag för flödesberäkningar inte kunde genomföras fullt ut. I praktiken har det varit nödvändigt att göra specifika antaganden och val av beräkningsmetoder för vart och ett av de ämnen som har kartlagts kvantitativt.

Kartläggning av sekundära flöden av kritiska råmaterial

Studien omfattar EU:s lista samt koppar, mangan och nickel, totalt 52 olika kritiska råmaterial. Samtliga har karaktäriserats kvalitativt med avseende på betydelse för tillverkning av klimatvänliga energitekniker samt återvinningspotential, se Figur 1. De tekniker som bedömdes vara viktigast för den svenska omställningen under de kommande decennierna var litiumjonbatterier, vindturbingeneratorer, elmotorer, bränsleceller och fotovoltaiska solceller. 19 råmaterial bedömdes vara av särskilt stor betydelse och av dessa valdes kobolt, platinagruppmetaller, neodym och indium ut för en fördjupad kartläggning av flöden och trender (Figur 1). De valdes dels för att de representerar de olika teknikslagen, dels för att de sekundära flödena är tillräckligt väl beskrivna i tillgängliga data. På grund av databrist var det inte möjligt att kartlägga samtliga 19 råmaterial inom ramen för den här studien.



Figur 1. 33 av 52 studerade kritiska råmaterial. I figuren saknas samtliga sällsynta jordartsmetaller utom neodym samt fyra platinagruppmetaller. Utöver de 17 ämnena med röda staplar bedöms även jordartsmetallerna dysprosium och praseodym vara av särskilt stor betydelse för den svenska omställningen. Råmaterialen har sorterats utifrån uppskattat ekonomiskt värde, i fallande storleksordning med ett högt värde till vänster i figuren och lågt värde till höger i figuren.

Återvinningen är låg för många kritiska råmaterial. I de flesta fall beror det på att värdet av materialet är för lågt för att motivera återvinningskostnaden, särskilt för de ämnen som används i låga koncentrationer i många produkter, så kallad dissipativ användning. Vissa kritiska råmaterial är dessutom omöjliga att återvinna, till exempel kokskol som förbränns till koldioxid och kiselmetall som oxideras till kiseldioxid. Det finns flera exempel internationellt på att stora återvinnare av kritiska råmaterial är samma aktörer som även tar emot primära flöden. Den

sekundära råvaran fungerar då som i stort sett vilken råvarukälla som helst och går in i flödet ihop med till exempel koncentrat. Möjligheterna och lönsamheten för ökad sekundärproduktion kan därför komma att gå hand i hand med ökad primärproduktion av kritiska råmaterial.

Både det totala värdet, pris per viktenhet och användningen kommer att ändras i och med att omställningen av energi- och transportsektorerna innebär ett kraftigt ökat beroende av kritiska mineral, metaller och andra material. I första hand bedöms neodym och niob inom en snar framtid bli, funktionellt återvinningsbara och av tillräckligt stor ekonomisk betydelse för att motivera investeringar i återvinning. Förändringarna i materialflöden kommer påverka bland annat metallernas uppehållstider i teknosfären, återvinningspotential och vilka aktörer som ingår i respektive värde-/försörjningskedja. En utmaning för att uppnå cirkularitet är att flera klimatvänliga energitekniker kräver hög renhet. Det är så gott som alltid lättare att återvinna ett material med hög renhet till ett nytt material med lägre renhet, så kallad downcycling, än tvärtom. Det gör till exempel att det är svårt att låta kobolt från en legering återvinnas till batteri, men det kan fungera att återvinna koboltinnehållande batterier till en legering.

Den fördjupade kartläggningen av kobolt, platinagruppmetaller, neodym och indium gav följande resultat, även om samtliga värden är mycket osäkra:

- Kobolt är en viktig komponent i bland annat litiumjonbatterier för elfordon. Dagens sekundära flöde av kobolt skattas till cirka 900 ton/år, varav 50 % ingår i legeringar, endast 5 % i elfordonsbatterier och ytterligare 10 % i andra batterier. Totalt återvinns cirka 400 ton/år, 200 ton/år exporteras och 300 ton/år förloras. Elektrifieringen av transportsektorn och energisystemet kommer bidra till en stor ökning av litiumjonbatterier som används i Sverige. Redan 2030 bedöms det sekundära flödet ha mer än fördubblats till 2 000 ton/år. Den viktigaste delorsaken är Northvolts långt gångna planer på att återvinna 800 ton/år. Enligt Northvolt kan det på länge sikt öka till så mycket som 4 000 ton/år.
- Platinagruppmetaller förväntas få en ökad användning i elektrolysörer för vätgasframställning och i bränsleceller. Dagens sekundära flöde av platinagruppmetaller skattas till cirka 4 ton/år, varav 1 ton/år kommer från fordonskatalysatorer och 2 ton/år från elektronik. Totalt återvinns cirka 3 ton/år, 0,5 ton vardera exporteras och går förlorat. Fram till 2045 bedöms det sekundära flödet minska med cirka 0,5 ton/år. Orsaken är att antalet fossildrivna fordon kommer att sjunka i takt med att de ersätts av elektrifierade fordon. Den minskningen av platinagruppmetaller från katalysatorer bedöms bli större än ökningen från klimatvänliga energitekniker.
- Neodym (tillsammans med de sällsynta jordartsmetallerna praseodym och dysprosium) spelar en viktig roll i framställningen av permanentmagneter, så kallade NdFeB-magneter. Dagens sekundära flöde av neodym skattas till cirka 150 ton/år, varav 40 % kommer från elektronik, och knappt 50 %

från magneter. Idag är återvinningen försumbar, men troligtvis finns en mycket stor potential. Användningen av neodym förutspås öka kraftigt de närmaste åren, framför allt inom sektorerna vindkraft och elektrifierade fordon. Eftersom det rör sig om komponenter med lång teknisk livslängd, särskilt vindkraft, kommer det att vara en betydande eftersläpning innan det sekundära flödet ökar i motsvarande grad.

- Indium används bland annat på olika plattskärmar men även på solceller. Dagens sekundära flöde av indium skattas till 2 ton/år, varav solceller LCD/TV-skärmar utgör 60 % och solceller 1 %. Återvinningen är mycket låg och även om solcellsinstallationerna ökar mycket snabbt kommer det att dröja flera decennier innan det ger en märkbar ökning i det sekundära flödet. Däremot kan återvinning av indium ur industriavfall bli aktuellt när efterfrågan ökar.

Utformning av spårbarhetssystem för ökad cirkularitet

En långsiktigt trygg och hållbar försörjning av råmaterial är av kritisk betydelse för Sverige och EU. Cirkularitet är ett sätt att öka försörjningsgraden. EU:s batteriförordning och relaterade europeiska näringslivsinitiativ på olika nivåer ska främja detta och på så vis möta den växande globala konkurrensen om batterimineral. En förutsättning är en funktionell återvinning av kritiska råmaterial (och andra material). För att kunna återvinna specifika material ur komplexa produkter, till exempel elfordonsbatterier, är det nödvändigt att aktörerna i varje steg av produktens livscykel har tillräckligt detaljerad och tillförlitlig information om produkten. En cirkulär ekonomi, inte minst för kritiska råmaterial, kräver därför spårbarhetssystem.

Samverkan och tillit mellan aktörerna i värde-/försörjningskedjorna är den avgörande framgångsfaktorn för etablering av spårbarhetssystem. Det finns flera skäl, varav de två viktigaste är att 1) de anslutna aktörerna täcker in en tillräckligt stor del av värde-/försörjningskedjan för att ge tillgång till den information som ska spåras och 2) det krävs en samskapande process för att uppnå en ändamålsenlig design.

Förenklat kan aktörerna i värde-/försörjningskedjorna för de aktuella kritiska råmaterialen drivas av externa lagkrav eller interna mål för cirkulär lönsamhet. Återvinnarna är en självklar nyckelaktör bland användarna, tillsammans med det ekosystem av återanvändare som finns och växer fram runt dem. Northvolt är ett intressant exempel på en aktör som bygger upp en helt ny värde-/försörjningskedja och i kraft av sin storlek kan ställa krav. De viktigaste kravställarna är lagstiftare och myndigheter, privatkonsumenter och professionella konsumenter. Härutöver finns även stödjande aktörer som på olika vis kan underlätta etableringen och acceptans nya system. Traditionellt utgörs de ofta av icke vinstdrivna och

oberoende intresseorganisationer, eftersom de ofta kan påverka allmänhetens/konsumenternas tilltro till olika spårbarhetssystem eller märkningar. För kritiska råmaterial kan London Metal Exchange också bli en mycket viktig stödjande aktör eftersom som de organiserar en stor del av världens handel av metaller.

Systemets komplexitet och omfattning styrs av dess syfte men rymmer i samtliga fall en lång rad detaljer att ta ställning till som kräver en bred expertis. Centrala frågeställningar är val av chain of custody-modell, standardisering, spårning av råmaterial eller produkt samt koppling mellan fysisk produkt/material och information. Därutöver är de tekniska aspekterna naturligtvis avgörande för ett fungerande spårbarhetssystem men de bör styras av hur systemet designas i övrigt. Det råder heller ingen generell brist på systemutvecklare eller teknikleverantörer med kompetens att tillhandahålla spårbarhetssystem.

Bland de hinder och utmaningar som måste övervinnas märks att ett otydligt ägarskap mellan och inom aktörer leder till osäkerhet. Det kan både leda till att aktörer avvaktar och att de väljer att gå före, vilket i båda fallen kan motverka den nödvändiga samverkan och tilliten. Osäkerheten kan förstärkas av otydliga spelregler. EU:s pågående arbete med batteriförordningen är ett tydligt exempel på snabb utveckling av formella spelregler som förväntas öka de externa drivkrafterna och minska osäkerheter. Osäkerhet om framtida betalningsvilja för sekundära råmaterial kan orsaka otydliga informella spelregler. I de fall de sekundära är dyrare, och inte främjas i tillräcklig utsträckning av de formella spelreglerna, måste mellanskillnaden motiveras med en högre betalningsvilja. En närbesläktad utmaning är att se till att investerare, konsumenter och producenter har tillräcklig kunskap för att kunna värdera den information som spårbarhetssystemet tillhandahåller. Asymmetrisk information bidrar till komplexitet och krav på långsiktighet, vilket också kan uppfattas som hinder. Till att börja med råder det brist på efterfrågade data hos många aktörer. Det saknas i många fall en gemensam helhetsbild av vilka data som finns, vilka som behövs och därmed vilka luckorna är. När data också ska användas av aktörer upp- och nedströms kan det innebära förväntningar på att samla in data som inte efterfrågas av den egna organisationen. Eftersom informationsutbytet i ett fungerande spårbarhetssystem i komplexa och globala värde-/försörjningskedjor måste vara automatiserat, krävs sannolikt en omfattande process- och systemintegration både inom och mellan aktörer. Att övervinna tillräckligt många av de hinder som står i vägen för fungerande spårbarhetssystem kräver uthållighet och långsiktighet. Slutsatsen blir att den sammanlagda komplexiteten är både kostnads- och resurskrävande. Det är nödvändigt men inte självklart att aktörernas drivkrafter är starkare och att möjligheten att nå cirkulär lönsamhet är större än det motstånd och de kostnader som hindren utgör.

För att gå vidare och konkretisera designen av spårbarhetssystem för kritiska råmaterial rekommenderas följande:

- Identifiera de viktigaste kritiska råmaterialen ur ett svenskt perspektiv, förslagsvis bland de 19 råmaterial som identifieras som prioriterade i den här studien. Lämpliga urvalskriterier är att 1) råmaterialet förekommer, eller bedöms inom en nära framtid förekomma, i betydande sekundära flöden , mätt i kronor snarare än kilogram, 2) det finns en befintlig eller framväxande bransch för återanvändning och återvinning inom landet och 3) den potentiella räckvidden för ett spårbarhetssystem överensstämmer tillräckligt väl med råmaterialets marknad, det vill säga att de aktörer som kan tänkas engageras täcker in en tillräckligt stor del av värde-/försörjningskedjan.
- Genomför en detaljerad aktörsanalys. För att uppnå nödvändig samverkan mellan aktörerna i värde-/försörjningskedjan behöver de identifieras. Därutöver är det nödvändigt att beskriva marknadslogiken för råmaterialet för att förstå aktörernas drivkrafter och möjligheter att nå cirkulär lönsamhet genom en bättre spårbarhet.
- Genomför en styrmedelsanalys. Spårbarhetssystem är ett medel för att nå målet att nå en ökad cirkulär ekonomi. Därför är det viktigt att en styrmedelsanalys utgår från vilket slags cirkularitet som ska uppnås för respektive råmaterial. Med den utgångspunkten går det sedan att analysera om ett visst spårbarhetssystem kan förväntas styra effektivt mot det målet eller ej. Är ökad återanvändning att föredra framför ökad återvinning, eller vice versa? Är reglering eller stimulans, genom till exempel offentlig upphandling, eller en kombination lämpligast för att stimulera detta.

Metod samt datatillgång inför kommande kartläggningar

Kartläggningen pekar på att det finns ett stort behov av att förbättra kunskapsunderlaget om materialanvändningen i den svenska teknosfären. Framtida kartläggningar skulle underlättas av förfinad avfallsrapportering och intervjuer med nyckelaktörer, varav flera listas av studien. De förväntas kunna tillföra relevant information om såväl flöden, återvinningstekniker och återvinningspotential som förutsättningar för en förfinad avfallsrapportering.

Eftersom avfallsstatistiken för sekundära flöden är otillräcklig för den här typen av kartläggningar bedöms en materialflödesmodell ge bättre resultat. Det gäller särskilt för komplexa produkter som består av många olika material, vilket ofta är fallet för kritiska råmaterial. Grundläggande för den föreslagna strukturerade modellen är att den ska balansera inflöden, utflöden och ackumulerade mängder av kritiska material i den svenska teknosfären. Utmaningarna som den här studien har ställts inför pekar på att det krävs en stor inledande ansträngning att bygga upp en

tillräckligt heltäckande modell och databas och därefter uppdatera denna kontinuerligt under en period.

- Utflöde (det vill säga sekundära flöden) beräknas som summan av de andelar av de senaste årens inflöde som blir avfall under aktuellt år.
- Andelen från ett specifikt år som blir avfall ökar från år till år under produktens livslängd.
- Inflöde beräknas med hjälp av nettoimport och inhemsk produktion av de olika produkter som innehåller det kritiska råmaterialet samt koncentrationen av det kritiska råmaterialet i produkten.
- Nettoimport, inhemsk produktion och koncentrationer i olika produkter varierar från år till år.

Data bör samlas i en för ändamålet avsedd databas som dels beskriver förändringar i tid, dels stödjer en automatiserad beräkning av olika flöden. Databasen behöver därför uppdateras efter hand som det finns nya data tillgänglig. Data för inflöden och materialsammansättning kombineras sedan med en modellerad livslängd för alla produktkategorier (eller produkter) som det finns data för. Modellen för livslängd bör använda en fördelningskurva, i stället för att ansätta ett värde som har varit nödvändigt i den här studien.

För att bekräfta riktigheten i beräkningarna är det därför lämpligt att också försöka beräkna de sekundära flödena direkt från data för insamling, materialbehandling och återvinning för respektive kritiskt råmaterial. Att förbättra statistiken genom att tillsätta fler mätpunkter eller göra ändringar i avfallskategorier är också ett sätt som kan förenkla och förbättra översyn på flöden av sekundära material i Sverige och på så vis minska behovet av den typ av kartläggning som diskuteras här. Den standardiserade beräkningsmodell som beskrivs ovan är inte begränsad till kritiska råmaterial utan skulle kunna utvidgas till fler material förutsatt att det går att samla in tillräckliga data.

Nyckelord: Svenska sekundära kritiska råmaterial, metallåtervinning, spårbarhet, råmaterialflöden, råmaterial, MFA, massflödesanalys, kobolt, PGM, platinagruppmetaller, neodym, indium

Inledning

Syfte och mål

För att uppfylla åtagandena i Parisavtalet krävs en mycket omfattande omställning av världens energi- och transportsystem. Den globala efterfrågan på metaller för klimatvänlig energiteknik bedöms därför öka dramatiskt de närmaste tjugo åren (International Energy Agency 2021; European Commission 2020a; World Bank Group 2020). En långsiktigt trygg och hållbar försörjning av råmaterial är av kritisk betydelse för Sverige och EU.

Den här studien syftar till att öka kunskapen om de sekundära flödena av kritiska råmaterial i den svenska teknosfären, hur flödena förväntas utvecklas framöver och hur en cirkulär ekonomi kan effektiviseras för dessa material, genom att:

- Kartlägga flöden och mängder av sekundära kritiska råmaterial enligt EU:s lista samt nickel, koppar och mangan.
- Beskriva förutsättningar, möjligheter och utmaningar med olika typer av spårbarhetssystem för råmaterial.
- Utveckla en metod samt beskriva datatillgång inför kommande fördjupade eller kompletterande kartläggningar.

Bakgrund

Den 24 mars 2021 gav regeringen SGU i uppdrag att tillsammans med Naturvårdsverket arbeta för att öka möjligheterna till hållbar utvinning av mineral och metaller från sekundära råmaterial (Näringsdepartementet, 2021). Uppdraget innehåller ett antal deluppgifter varav en handlar om att ge en överblick över flöden av kritiska mineral och metaller samt att föreslå system för hur livscykelanalys och spårbarhet kan utformas för att bidra till en cirkulär ekonomi.

En hållbar och varaktig tillgång till innovationskritiska metaller och mineral kan bidra till att bibehålla Sveriges framtida industriella konkurrenskraft och innovationskapacitet. Inhemsk mineralutvinning minskar såväl landets som EU:s sårbarhet när det gäller råmaterialförsörjning vid störning i den internationella handeln. Innovationskritiska mineral och metaller är ett av de prioriterade områdena i de svenska regeringens strategi för en cirkulär ekonomi och är nödvändiga i klimatomställningen. Primära råmaterial ska så långt det är möjligt ersättas av resurser som används effektivt i cirkulära flöden. Hänsyn ska tas till behov av att tillföra primära råmaterial för att möjliggöra klimatomställning och materialåtervinning. Hållbar utvinning och återvinning av sekundära råmaterial är ett växande komplement till brytning av primära mineralresurser. Betydande mängder resurser lämnar Europa i form av avfall och skrot, som potentiellt går att återvinna till sekundära råmaterial här. Genom mer forskning om återvinning av

avfall kommer det att kunna undvikas att värdefulla material hamnar i deponi. För att åstadkomma användning av sekundära råmaterialresurser på ett strukturerat och tillförlitligt sätt behöver bland annat kartläggning, statistik och spårbarhet utverkas.

Den 3 september 2020 presenterade kommissionen meddelandet Resiliens för råmaterial av avgörande betydelse (European Commission, 2020b). Syftet med meddelandet är att staka ut vägen mot ökad trygghet och hållbarhet, och därmed bidra till ekonomisk återhämtning och långsiktig omställning i linje med den gröna given, kommissionens handlingsplan för cirkulär ekonomi och EU:s industristrategi. Ekonomisk betydelse och försörjningsrisk är de två huvudparametrar som används för att fastställa avgörande betydelse för EU. I meddelandet ingår EU:s förteckning över råmaterial av avgörande betydelse. Från och med år 2020 innehåller listan 30 råmaterial där de flesta utgörs av mineral och metaller (Tabell 1). Utöver de listade råmaterialen finns det andra mineral och metaller som kan vara av intresse att kartlägga. Specifikt intressant ur ett svenskt perspektiv är de som används och kommer att användas i stor utsträckning för exempelvis tillverkning av elfordonsbatterier, särskilt nickel, mangan och koppar.

Tabell 1. EU:s lista över kritiska råmaterial.

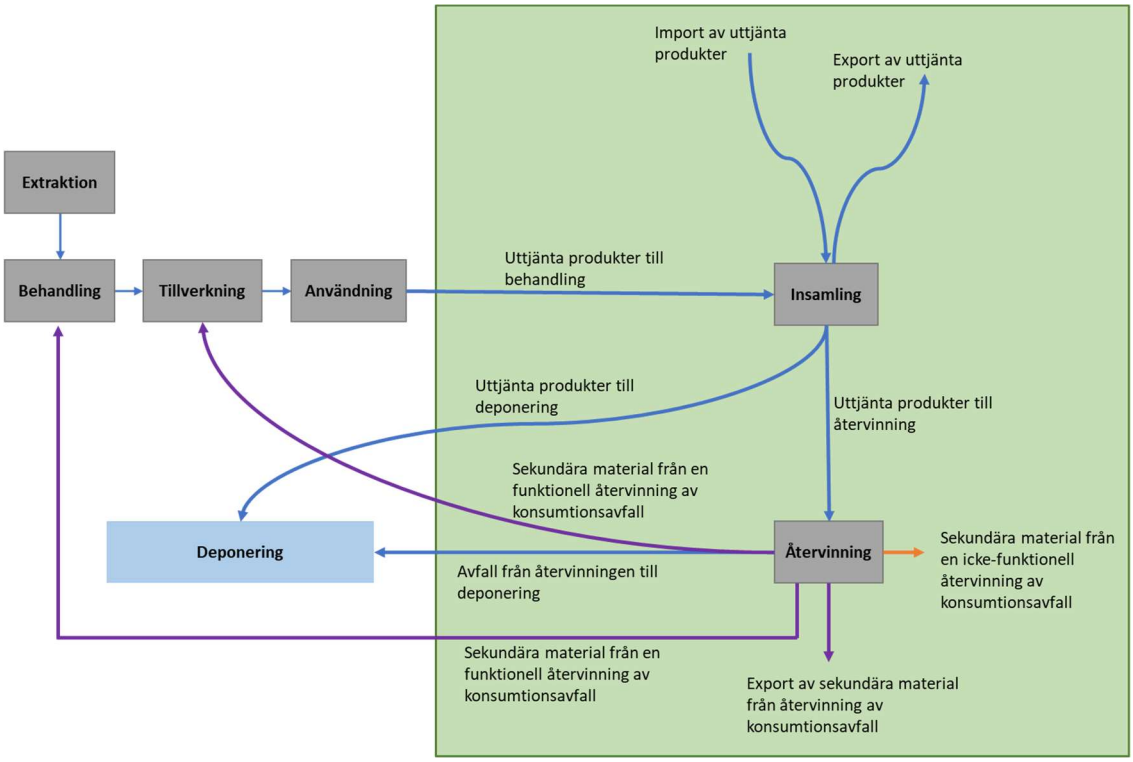
Antimon	Hafnium	Niob
Baryt	Indium	Platinagruppmetaller
Bauxit	Kiselmetall	Skandium
Beryllium	Kobolt	Strontium
Borat	Kokskol	Tantal
Flusspat	Litium	Titan
Fosfor	Lätta sällsynta jordartsmetaller	Tunga sällsynta jordartsmetaller
Fosforit	Magnesium	Vanadin
Gallium	Naturgummi	Vismut
Germanium	Naturlig grafit	Volfram

Material och metod

Avgränsning av studerade materialflöden

Studien fokuserar på sekundära flöden genom den svenska teknosfären. I det här sammanhanget tolkas det som produktflöden, det vill säga en avgränsning till de flöden där de studerade råmaterialen har passerat en användarfas innan de blir avfall och eventuellt går till återvinning. Med den här definitionen utesluts med andra ord avfall från gruvor och tillverkningsindustri. Det är visserligen material som framställts genom teknologiska processer, men inte i syfte att användas. Avgränsningen har valts för att anpassa studiens innehåll till dess omfattning. Det ska understrykas att avfall från både gruvor och industrier är mycket viktiga sekundära flöden för många råmaterial och som i flera fall bedöms bli än viktigare i framtiden.

En fullständig kartläggning av flödesvägar för de studerade råmaterialen skulle inkludera beskrivningar av var råmaterialen kan uppehålla sig från det att de tillförs teknosfären (källor) i form av produkt, antingen genom tillverkning i Sverige eller import till Sverige, tills det att de lämnar systemet eller slutar flöda (sänkor). Sänkorna kan utgöras av export från Sverige, att materialet ingår i en produkt med så lång teknisk livslängd att den i praktiken utgår, att materialet förbrukas, deponeras eller förbränns eller återvinns på ett icke-funktionellt vis. Det är vidare önskvärt att kartläggningen beskriver att råmaterial har olika långa uppehållstider i teknosfären, att vissa produkttyper kan återanvändas, skillnader mellan funktionell och icke-funktionell återvinning och att vissa råvaror återvinns flera gånger och att det ibland innebär en så kallad downcycling av materialets egenskaper. Sammantaget skulle detta innebära en mycket komplex beskrivning, som dessutom skiljer sig åt mellan olika flöden. Den här studien har därför avgränsats till de sekundära flöden som åskådliggörs inom det gröna fältet i Figur 2.



Figur 2. En systemgräns (grön markering) som fokuserar på hur mycket som kommer ut från användarfasen och vart dessa flöden tar vägen i slutändan (avfallsflöden). Efter BIO by Deloitte (2015).

Litteraturstudie

Kartläggningen inleddes med en litteraturstudie för att i första hand få en översikt över hur de ingående råmaterialen flödar genom teknosfären. Tre särskilt viktiga frågeställningar var 1) vilka råmaterial som används i klimatvänlig energiteknik, 2) hur råmaterial återvinns i dagsläget och 3) hur efterfrågan och återvinning av dessa material bedöms förändras i framtiden. Detta låg till grund för prioriteringen av studerade ämnen, se nedan. Under den inledande litteraturstudien noterades även tillgång till relevanta kvantitativa data, som en förberedelse inför de kommande stegen.

De viktigaste källorna som ingick i litteraturstudien omfattar:

- **EU-kommissionens rapporter på kritiska och icke-kritiska råmaterial 2020** (European Commission, 2020c; European Commission, 2020d). Rapporterna användes som vägledning för att ta fram de produktkategorier som stod till grund för kartläggningen samt grunddata för användning och återvinning inom EU.
- **Mineralmarknaden 2020, Tema: Kobolt** (SGU, 2021). Rapporten användes för att ta fram en verklighetstrogen modell för kobolt i Sverige ur de data som finns tillgänglig i dagsläget.

- **The lithium-ion battery life cycle report 2021** (CES, 2020). Data på livslängd och allmän detaljerad och trovärdig information om litiumjonbatterier i olika produkter.
- **Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, A Foresight Study** (European Commission, 2020a). Tydliga beskrivningar av produkter och komponenter där kritiska material befinner sig samt vilka delar av leverantörskedjan där dessa produkter är kritiska.
- **Scenarier över Sveriges energisystem 2020 (**Energimyndigheten, 2021b**).** Rapport som användes för att bestämma hur trender i el-produktion och användning av bränslen kan komma att variera i framtiden, och på så sätt hur behovet av kritiska råmaterial kan påverkas.
- **Användning och återvinning av potentiellt kritiska material, Kunskapsöversikt** (Ljunggren M. S. & Ingemarsdotter E., 2014). Användes som guide för att ta fram de viktigaste aspekterna vid modellering och presentation av råvaruflöden.
- **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions** (International Energy Agency, 2021). En överblick av kritiska material för energiomställningen ur ett globalt perspektiv.
- **Net Zero by 2050 A roadmap for the Global Energy Sector** (IEA, 2020). Hur energisektorn kan komma att ändras globalt över tid.
- **Preserving Value in EU Industrial Materials** (Material Economics, 2020). Information om materialanvändning i europeisk och svensk industri.
- **Så når Sverige klimatmålen** (Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien, 2020). Hur de svenska sektorerna kommer behöva ändras påverkas av att gå mot mindre växthusgasutsläpp.

Statistikgenomgång

Utöver de data som har hämtats ur litteraturen (se ovan), har statistik från ett antal databaser gåtts igenom. Bland annat har data från Statistiska centralbyrån, SCB, gåtts igenom.

I projektets tidiga skede har flera av SCB:s statistikdatabaser genomsökts med syftet att hitta data för att få information om hur de aktuella råmaterialen flödar i teknosfären ur Sveriges perspektiv. Vid genomgången av data avseende behandlat avfall indelat efter typ av behandling och avfallsslag (SCB, 2020a), samt uppkommet avfall efter egenskap och näringsgren och avfallsslag (SCB, 2020b) konstaterades att den redovisade detaljnivån för avfallsslag är för låg för att få information om exempelvis återvinningsgrader eller flöden för de specifika råmaterialen.

SCB har även statistik för export och import av anmälningspliktigt avfall efter mottagarland respektive avsändarland (SCB, 2020c; SCB, 2020d). Även för den här statistikdatabasen var detaljnivån för avfallsslag för låg för att kunna få ut information om återvinningsgrader eller flöden för de specifika råmaterialen. Det finns mer detaljerade data att tillgå, men det måste i så fall begäras ut från exempelvis Naturvårdsverket. Det alternativet testades i fallet med elektronikavfall, vilket gav värdefull extra information men detaljnivån var ändå för låg för att få ut information om de specifika råmaterialen.

För elektronikavfall och uttjänta batterier finns egna statistikdata avseende behandlad mängd (SCB, 2020e; SCB, 2020f). I data för behandlad mängd batterier anges data för olika typer av batterier. I det här datasetet hade det varit önskvärt med en annan särskiljning av batterier då exempelvis litiumbatterier och litiumjonbatterier redovisas tillsammans, trots att de har olika användningsområden (exempelvis används litiumjonbatterier i uppladdningsbara fordon).

SCB tillhandahåller även statistik för varuimport, varuexport och industrins varuproduktion efter varugrupper och anges bland annat som kombinerad nomenklatur (KN). KN finns i olika detaljnivå, där KN 8 är högst med en åttasiffrig varukod. Varukoden är gemensam för alla EU-länder i deras utrikeshandelsstatistik samt för EU:s tulltaxa. Statistiken för varuimport, varuexport och varuproduktion (SCB, 2021a; SCB, 2021b; SCB 2021c) har till viss del kunnat ge information om flöden för produkter och även råmaterial som exempelvis kobolt.

Ingen ny datainsamling har skett som del av den här studien. Utöver statistikgenomgång från SCB har nedanstående databaser ingått i statistikgenomgången:

- **Circular Energy Storage** Online the lithium-ion battery lifecycle data platform. Europeisk statistik för litiumjonbatterier (CES, 2021). Utifrån denna statistik har trender för litiumjonbatterier i olika kategorier tagits ut för uttjänta batterier och för trender i användning.
- **Trafikanalys** nationell databas över vägtrafik (Trafikanalys, 2021). Från denna databas har hämtats information om antal fordon i trafik, antal nyregistrerade och avregistrerade fordon.
- **Bil Sweden** nationell databas över nyregistrerade personbilar, lastbilar och bussar (Bil Sweden, 2021).

Beräkningar

Ursprunglig ambition var att formatera data på ett enhetligt vis för samtliga prioriterade ämnen. Det skulle ha gjort det möjligt att beräkna de sekundära flödena på ett konsekvent vis, vilket skulle ha underlättat att jämföra och tolka resultaten, hantera osäkerheter med mera. Litteraturgenomgången och statistikgenomgången visade emellertid på ett tidigt stadium att det inte var möjligt,

på grund av brist på data som beskriver sekundära flöden av kritiska råmaterial i den svenska teknosfären. I praktiken har det därför blivit nödvändigt att göra specifika antaganden och val av beräkningsmetoder för vart och ett av de ämnen som har kartlagts kvantitativt. Detta kommenteras i respektive resultatavsnitt.

Prioritering av studerade ämnen

EU har analyserat användning av ett stort antal olika råmaterial, inklusive samtliga kritiska råmaterial. Däremot saknas i hög utsträckning kvantitativa data för sekundära flöden av kritiska råmaterial i den svenska teknosfären. Befintlig datainsamling fokuserar ofta på stora flöden. De kritiska råmaterialen förekommer i små mängder och främst som tillsatser i andra flöden. Till exempel utgör nickel ett av de största flödena av de ingående råmaterialen, med en årlig förbrukning av cirka 300 000 ton/år i EU. Trots att nickel används i batterier av olika slag är den användningen helt försumbar jämfört med användningen i olika stållegeringar (European Commission, 2020d). Den accelererande ökningen av kritiska ämnen syns inte i de sekundära flödena än. Vindkraft, solkraft, fordonsbatterier har inte börjat återvinnas. De sekundära flödena av kritiska råmaterial försvinner i bakgrundsbruset. Det har därför varit nödvändigt att prioritera bland de studerade ämnena.

Bruttolistan utgörs av 52 olika kritiska råmaterial. EU:s lista består av 27 enskilda ämnen och 3 ämnesgrupper (Tabell 1). Dessa ämnesgrupper består i sin tur av totalt 16 lätta och tunga sällsynta jordartsmetaller och 6 olika platinagruppmetaller. Dessutom ingår koppar, mangan och nickel i studien (som av EU beskrivs som icke-kritiska råmaterial eftersom tillgången är god).

De 19 råmaterial som är nödvändiga för tillverkning av klimatvänliga energitekniker gavs i den här studien **hög prioritet**, se Tabell 2. D De tekniker som bedömdes vara viktigast för den svenska omställningen under de kommande decennierna var litiumjonbatterier, vindturbingeneratorer, elmotorer, bränsleceller och fotovoltaiska solceller. Fyra av dessa råmaterial gavs **högsta prioritet** och har ingått i den kvantitativa kartläggningen, se Tabell 3. De valdes dels för att de representerar de olika teknikslagen, dels för att de sekundära flödena är tillräckligt väl beskrivna i tillgängliga data. På grund av databrist var det inte möjligt att kartlägga samtliga 19 ämnen inom ramen för den här studien. De råmaterial som bedömdes vara svårast att återvinna (och därmed inte kunna ge upphov till sekundära råmaterial) gavs **lägst prioritet**, se Tabell 4.

Tabell 2. Kritiska råmaterial som prioriterats högt i studien, på grund av att de är nödvändiga i de klimatvänliga energitekniker som bedömts vara viktiga för den svenska omställningen

Borat	Kiselmetall	Naturlig grafit	Platinagrupp-metaller
Dysprosium	Kobolt	Neodym	Praseodym
Gallium	Koppar	Nickel	Strontium
Germanium	Litium	Niob	Titan
Indium	Mangan	Palladium	

Tabell 3. Kritiska råmaterial som prioriterats högst i studien. De valdes bland de 19 högt prioriterade råmaterialen för att de representerar de olika tekniskslagen och för att de sekundära flödena är tillräckligt väl beskrivna i tillgängliga data

Råmaterial	**Användning (exempel)**
Indium	LCD-skärmar, batterier och fotovoltaiska solceller.
Kobolt	El-fordon och andra batterier (Li-jon, NiMH).
Neodym	Permanentmagneter, som bland annat ingår i vindturbiner och elmotorer. Styr tillgången på bland annat dysprosium och praseodym eftersom de metallerna utvinns tillsammans med neodym, där efterfrågan är större.
Platinagrupp-metaller	Fordonskatalysatorer och övrig elektronik. Krävs för att tillverka elektrolysörer för vätgasproduktion.

Tabell 4. Kritiska råmaterial som prioriterats lågt i studien, på grund av svårigheter att återvinna

Råmaterial	**Motivering**
Baryt	Bedöms ha låg betydelse för Sverige och minskande globalt. Troligtvis svår att återvinna.
Bauxit	Omvandlas till aluminium som redan återvinns i hög utsträckning (eller icke återvinningsbar form).
Kokskol	Omvandlas till icke återvinningsbar form.
Naturgummi	Omvandlas till icke återvinningsbar form.

Resultat och diskussion

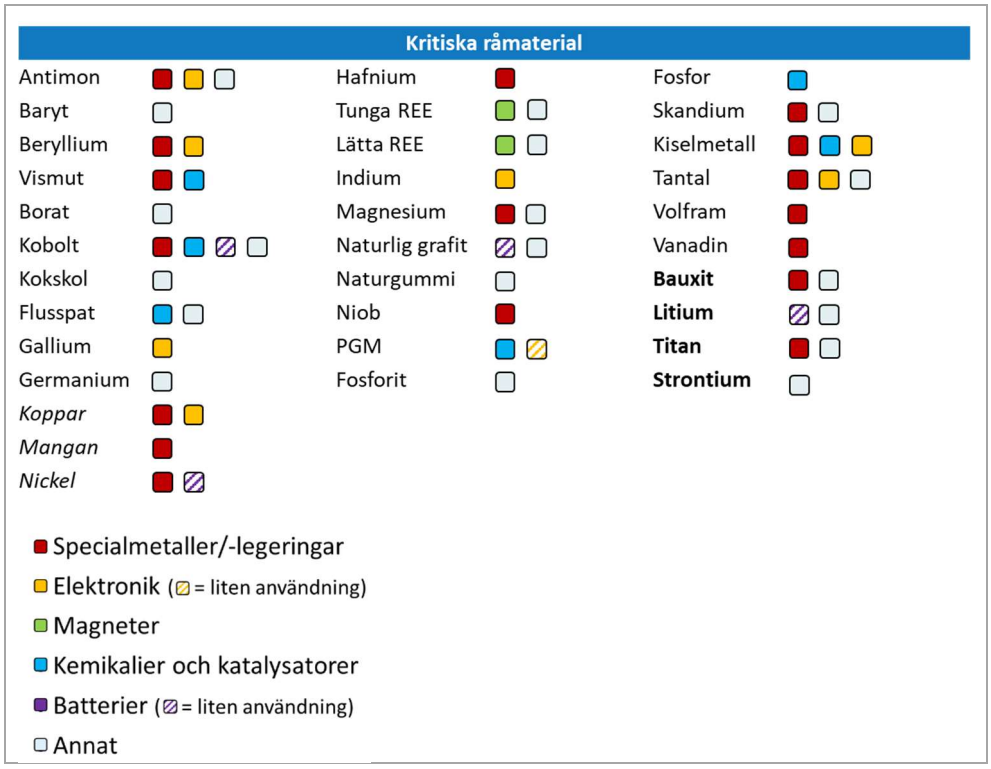
Kartläggning av sekundära flöden av kritiska råmaterial

Generella observationer

För att få en överblick av var de kritiska råmaterialen finns och därmed också var de sekundära flödena borde finnas så gjordes en översiktlig genomgång av alla kritiska råmaterial som beskrivs i European Commission (2020c) och de tre metallerna koppar, mangan och nickel som beskrivs i European Commission (2020d). Sammanställningen illustreras i Figur 3 på nästa sida. Många av råmaterialen används som specialmetaller eller i legeringar där speciella egenskaper så som exempelvis hög hållfasthet eller värmetålighet krävs, vilket i den här studien inkluderar karbider. Ett flertal av råmaterialen går att hitta i elektronik, några används som kemikalier och/eller katalysatorer, men de flesta har någon form av specialanvändning. Två sådana specialanvändningar som anses vara viktiga för en energiomställning i Sverige är batterier och magneter, vilket har markerats i Figur 3. En annan observation är att de primära och sekundära flödena av flera kritiska råmaterial inte är tydligt åtskilda, vilket har betydelse för potentialen av en ökad återvinning. Detta utvecklas nedan.

Avvägning mellan återvinning med hög renhet och av stora flöden

De ämnen som används som specialmetaller eller i legeringar kan teoretiskt sett återvinnas som specialmetaller eller i legeringar. Svårigheter uppstår bland annat om specialmetallerna/legeringarna inte identifieras korrekt vid sortering eller om ämnet används i för låg koncentration för att det ska vara värt att sortera ut som en egen fraktion. Vissa användningsområden kräver hög renhet och det är så gott som alltid lättare att återvinna ett material med hög renhet till ett nytt material med lägre renhet, så kallad downcycling, än tvärtom. Det gör till exempel att det är svårt att låta kobolt från en legering återvinnas till batteri, men det kan fungera att återvinna koboltinnehållande batterier till en legering. Ur ett resursperspektiv så är det önskvärt att behålla så hög kvalitet/renhet som möjligt på de strömmar som går till återvinning, men samtidigt så kan en ökad återvinning av även lägre kvalitet/renhet vara värt att beakta om det frigör mer primär råvara till de flöden som kräver en högre kvalitet/renhet.



Figur 3. Användningsområden för kritiska råmaterial. De material som tillkommit sedan 2017 markerade i fetstilt. Koppar, mangan och nickel ingår i studien men klassas inte av EU som kritiska.

Sekundära och primära flöden går hand-i-hand

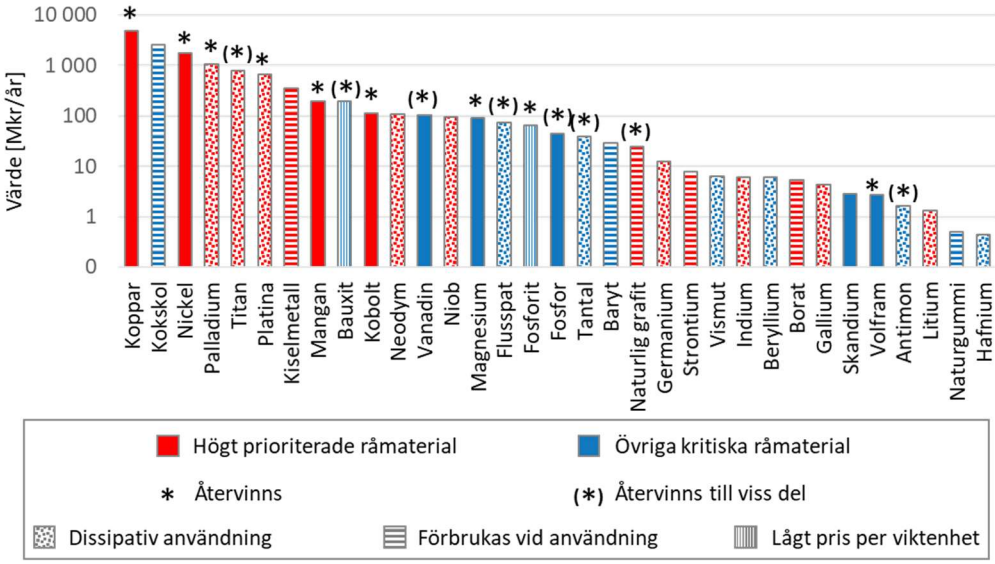
Det finns många exempel på att de största och mest framgångsrika återvinnarna är samma aktörer som även utvinner den primära råvaran. Den sekundära råvaran fungerar då som i stort sett vilken råvarukälla som helst och går in i flödet ihop med till exempel malm eller koncentrat. Då de redan har tekniken för att förädla den primära råvaran så är det oftast inte ett allt för stort steg att även ta in sekundär råvara i samma flöde. De har ofta också den storlek som krävs för att få ihop ekonomin i att ta hand om stora flöden av sekundära råvaror som ofta har ett lågt värde per viktenhet. Några sådana exempel är Boliden och Umicore som presenteras i mer detalj i stycket om Identifierade nyckelaktörer nedan. Det finns också många exempel på aktörer som senare i värdekedjan tar in sekundära flöden för att tillverka sina produkter. Det sker framför allt om det sekundära flödet är billigare än det primära, eller om det sekundära flödet är enklare och säkrare att få tag på. Typiska exempel på återvinnare av det slaget är aktörer som producerar specialmetaller/legeringar. Det har också märkts att producenter av litiumjonbatterier har säkrat upp sina behov av litium och kobolt genom att ta in sekundära flöden av batterier.

Andra flöden kan ofta gå före de sekundära

I dagsläget är återvinningsgraden för många metaller låg globalt, för kritiska metaller och mineral i flera fall under 1 % (Arvaniditis, 2019). Därför kommer samhället ännu under lång tid i hög grad att vara beroende av primära råmaterial. Därför är det viktigt att resursutnyttjandet i alla led i värdekedjan är så högt som möjligt. Många av de kritiska råmaterialen utvinns som biprodukter till någonting annat. Till exempel framställs kobolt huvudsakligen som biprodukt vid framställning av nickel eller koppar, indium är oftast en biprodukt vid framställning av zink och de sällsynta jordartsmetallerna finns oftast blandade i samma malm. Det gör att det i vissa fall är enklare och billigare att utvinna lite mer biprodukt ur de flöden där det tidigare inte riktigt lönat sig att utvinna i stället för att börja ta in sekundära flöden. Det gör också att det som tidigare gick som gruvavfall kan löna sig att utvinna, vilket gör att gränsen mellan primära och sekundära råvaror kan bli lite suddig om en sekundär råvara (gruvavfall) helt plötsligt blir primär (biprodukt).

Återvinning

Det ekonomiska värdet spelar en viktig roll vid återvinning av ett råmaterial, vilket illustreras i Figur 4. Studien har skattat värdet av varje råmaterial som används i svensk slutkonsumtion med hjälp av uppgifter på mängder (ton/år) och priser (kr/ton) från European Commission (2020c, 2020d). Genom att multiplicera dessa erhölls totala värden för slutkonsumtion i EU. Den svenska andelen skattades till 3,5 %, vilket motsvarar Sveriges andel av EU:s BNP. Mängden av neodym har dock uppdaterats utifrån den här studiens resultat, vilket förklaras i stycket om Kvantitativa skattningar för neodym nedan. Figur 4 illustrerar det uppskattade värdet av de flesta av de råvaror som inkluderats i studien. Palladium och platina har dock fått fungera som illustration för värdet av alla platinagruppmetaller. Neodym har fått fungera som illustration för värdet av alla sällsynta jordartsmetaller.



Figur 4. 33 av 52 studerade kritiska råmaterial. I figuren saknas samtliga sällsynta jordartsmetaller utom neodym samt fyra platinagruppmetaller. Utöver de 17 ämnena med röda staplar bedöms även jordartsmetallerna dysprosium och praseodym vara av särskilt stor betydelse för den svenska omställningen. Råmaterialen har sorterats utifrån uppskattat ekonomiskt värde, i fallande storleksordning med ett högt värde till vänster i figuren och lågt värde till höger i figuren.

Det måste löna sig ekonomiskt att återvinna

Som synes så är det framför allt de råvaror som har ett högt totalt värde som återvinns. Till vänster i figuren är det många råvaror som återvinns i hög eller låg utsträckning. De råvaror som ligger långt till vänster i figuren utan att ha någon väsentlig återvinning är bland annat de råvaror som förbrukas vid användning (exempelvis kokskol och kiselmetall). Två råvaror som syns relativt långt till vänster, utan väsentlig återvinning och utan att förbrukas vid användning är neodym och niob. I fallet med neodym spås det en snabbt växande marknad för sekundära material i och med elektrifiering av fordonsflottan samt utbyggnaden av vindkraften. Niob har inte studerats närmare i den här studien, men går enligt European Commission (2020c) framför allt till en icke-funktionell återvinning på grund av att stål som innehåller niob återvinns som stål med en lägre kvalitet. Volfram och antimon återvinns i hög respektive låg utsträckning trots att de ligger långt till höger i figuren. Antimon återvinns framför allt i form av blylegeringar och då är det snarare värdet av bly som driver återvinningen. Bly används i stor omfattning och skulle ha hamnat mellan bauxit och kobolt i figuren om det hade inkluderats, med ett totalt värde strax över 100 miljoner kr/år. Volfram används framför allt i form av karbider på hårda ytor för slipande, skärande och borrande verktyg. Dessa verktyg är relativt enkla att samla in, från industriell verksamhet, där verktygen kan skickas tillbaka till försäljaren i samband med att de byts ut mot nya. En effektiv återvinningskedja gör att det är lönt att återvinna trots att det totala värdet är relativt lågt. Då volframkarbiden dessutom oftast sitter fast på ett stål med

hög halt av kobolt eller nickel så ökar värdet ytterligare på det material som samlas in för återvinning.

Dissipativ användning försvårar återvinning

Material med så kallad dissipativ användning används i låga koncentrationer blandade med stora volymer av andra material. Det gör det svårare att återvinna än ämnen som används i ren eller så gott som ren form. Det är lättare att återvinna metallbitar av titan än att återvinna det vita pigmentet titandioxid som används i färg. På ett liknande sätt så är det lättare att återvinna tonvis av neodymmagneter om de går att separera från stora vindkraftsturbiner jämfört med att försöka samla in och separera samma mängd magneter från små högtalare i mobiltelefoner och headset.

Det går inte att återvinna något som förbrukas vid användning

Några av de kritiska råmaterialen går helt enkelt inte att återvinna utifrån det som de används till idag. Kokskol som förbränns till koldioxid är ett sådant exempel. Kiselmetall som oxideras till kiseldioxid/silikater vid stålframställning är ett annat exempel. Baryt som pumpas ner i marken för att få fram mer olja/gas tappar sitt syfte om den sedan ska pumpas upp igen. Naturlig grafit bryts ofta ner under användningsfasen vid stålframställning och bildar i slutändan koldioxid. Den delen av grafiten som är kvar när resten av materialet är förbrukat går visserligen att återvinna, men det är än så länge endast en liten andel som går till återvinning. Strontium används till stor del vid borrning på ett liknande sätt som baryt, men även för att ge färg åt pyrotekniska produkter, vilket i båda fallen förbrukas vid användning. Det strontium som används för att till exempel ge styrka åt vissa aluminiumlegeringar går att återvinna till en likadan legering, men den andelen är försvinnande liten. Borat används oftast i glas- och keramikframställning och kan i princip återvinnas som glas igen, men det används i dagsläget framför allt i glasull och värmetåligt glas, som är applikationer som inte återvinns. Det sista exemplet på ämnen som förbrukas vid användning är naturgummi, vilket omvandlas genom så kallad vulkanisering från en klibbig och formbar massa till ett formstabilt material. Efter vulkaniseringen så går det inte att forma om gummit och det går inte längre att få tillbaka naturgummits egenskaper.

Identifierade nyckelaktörer

Här nedan listas några nyckelaktörer inom återvinning av kritiska råmaterial. Listan är troligtvis inte komplett och inkluderar inte förbehandlare av avfall, så som Stena Technoworld, Kuusakoski och SIMS som förbereder elektronikavfall för materialåtervinning hos andra aktörer.

Arc Metal: Återvinner ädelmetaller (primärt platinagruppmetaller så som platina, palladium och rodium) ur skrot och andra avfall med höga halter platinagruppmetaller. En stor del av det skrot som hanteras är katalysatorer från fordon, främst från Norden och Europa. Metallerna utvinns som ett koncentrat (blandad legering) som måste raffineras vidare utomlands innan det blir rena

metaller av platina, palladium och rodium (Arc Metal, 2021). Majoriteten av ”avfall och skrot av platina” som exporteras från Sverige har de senaste åren gått till Storbritannien, Schweiz och Tyskland, men det är oklart om det också inkluderar Arc Metals koncentrat. Utifrån den omsättning som bolaget redovisat 2013–2020 (Bolagsfakta, 2021) och de råvaror som återvinns så borde mängden återvunnet koncentrat vara i storleksordningen av 1 ton platinagruppmetaller per år.

Boliden: Vid två av Bolidens svenska verk återvinns ett flertal av de studerade ämnena. Vid Bergsöeverket återvinns blylegeringar från blybatterier, vilket inkluderar antimon. Från Bolidens årsrapport (Boliden, 2021a), några av deras säkerhetsdatablad (Boliden, 2021b), litteraturdata om antimonhalt i blybatterier (Liu & Qiu, 2018) samt en äldre rapport om användning och spridning av antimon i Sverige (Sternbeck et al., 2002) så går det att göra uppskattningar om vilka mängder det motsvarar. Vid Rönnskärsverket utvinns bly, zink, koppar och ädelmetaller från primär och sekundär råvara. Det används ca 85 000 ton elektronikskrot per år (Boliden, 2021a), där plasten utnyttjas som ett bränsle och reduktionsmedel i smältprocessen samtidigt som metallerna smälts ner och raffineras. En del av det elektronikskrot som används i processen består av kretskort, vilket gör att det går att approximera ungefär vilka kritiska material som återvinns och vilka mängder det handlar om (Tesfaye et al., 2017). Det material som tas om hand borde innehålla en mix av koppar, platinagruppmetaller (framför allt palladium), antimon, nickel, vismut, tantal, gallium och indium samt några andra metaller (guld, silver, bly, tenn och zink) som inte ingår i den här studien. Baserat på de mängder och koncentrationer som presenteras i deras årsrapport (Boliden, 2021a), på deras hemsida (Boliden, 2021c) och i diverse säkerhetsblad (Boliden, 2021b) så kan de återvunna mängderna uppskattas till följande:

- Koppar: cirka 55 000 ton/år, från elektronik och annan sekundär råvara. Funktionell återvinning inom Sverige.
- Nickel: utvinns som biprodukt, i form av rånickelsulfat ($NiSO_4$), från kopparproduktionen. Den totala produktionen (Sverige och Finland) uppgår till 1 000–2 000 ton/år. Det nickel som kommer in från sekundära källor (från elektronik och annat) till Rönnskärsverket kommer troligtvis återvinnas funktionellt inom Sverige, men mängderna är då betydligt lägre än vad som utvinns totalt.
- Antimon: Uppskattningsvis ca 350 ton per år, mestadels från blybatterier men även en liten del från elektronik. Mängden är svår att skatta utifrån återvinningsgrad för elektronik. Intervallet skattas till 200–1 400 ton/år, men med en maximal mängd på 4 600 ton/. Funktionell återvinning inom Sverige.
- Platinagruppmetaller: cirka 2 ton/år, mestadels från elektronik, nästan uteslutande palladium med mindre än 0,2 ton platina och andra platinagruppmetaller. Funktionell återvinning, men troligtvis exporterad utomlands.

- Vismut: Ingen tydlig uppgift från Boliden, men metallen borde vara återvinningsbar, det vill säga funktionell återvinning. Enligt uppgift från muntlig källa till EU-rapporten om kritiska råvaror (European Commission, 2020c) så sker återvinning via export utomlands.
- Tantal/gallium/indium: Återvinns troligtvis inte i dagsläget och det är troligtvis inte lönsamt att göra någon stor investering för att börja utvinna det heller, så vida det inte kommer in mer material från malmen eller något annat material.

EasyMining: har en process för att återvinna fosfor ur askan från förbränningen av avloppsslam. Det verkar inte ske någon återvinning i dagsläget annat än i forsknings- och pilotskala. (EasyMining, 2021)

LKAB: har planer på att börja utvinna fosformineralgödsel och REE ur apatit från sitt gruvavfall (LKAB, 2019). Ur detta gruvavfall så kommer det även utvinnas en del fluor, vilket kan ersätta flusspat. Gruvavfallet räknas inte in bland de sekundära flöden som inkluderats i den här studien, men det finns en potential att samköra deras process med en process för återvinning av magneter vilket ingår i den här studien. LKAB säger att deras plan just nu är att ha sin produktion (från primär råvara) i gång 2027 (LKAB, 2021).

Det har körts ett stort EU-projekt (REECOVER, budget 7,9 M EUR) där det har utvecklats metoder för utvinning och återvinning av sällsynta jordartsmetaller från magneter och gruvavfall. Det verkar som att den hydrometallurgiska processen (och allt därefter) ska kunna samköras för de två materialen (CORDIS, 2017). Det sker alltså ingen återvinning av sällsynta jordartsmetaller i dagsläget, men det kan kanske starta från magneter någon gång omkring, eller efter, 2027.

LKAB Minerals: Återvinner eldfasta material, vilket minskar åtgången på aluminiumoxid och därmed bauxit. Det minskar även åtgången av magnesit som är ett mineral som innehåller magnesium. Magnesit är inte ett kritiskt råmaterial, men det är magnesium.

Mat4Green Tech: Ett startup-bolag som sägs ha återvinningsteknik för indium. Det finns inga uppgifter på att de har påbörjat någon återvinning i dagsläget annat än på forsknings- eller demonstrationsnivå (Mat4Green Tech, 2021; Energimyndigheten, 2020). Eftersom indium huvudsakligen används i väldigt tunna skikt av bland annat indium-tenn-oxid (ITO) eller CIGS-solceller så lär deras första återvinning fokusera på industriavfall snarare än uttjänta produkter. Detta resonemang utvecklas ytterligare under avsnittet om Kvantitativa skattningar för indium nedan.

Midsummer: Tillverkar CIGS-solceller som de har utvecklat en återvinningsmetod för (Gustafsson, 2014; Engineering News, 2014), men vi har inga uppgifter på om återvinningsmetoden används eller ej. Om det sker någon återvinning så är det troligtvis endast från industrispill, vilket är ett resonemang som utvecklas ytterligare under avsnittet om Kvantitativa skattningar för indium nedan.

Northvolt: Tillverkar litiumjonbatterier och har även planer på att återvinna litiumjonbatterier i framtiden. Återvinningsanläggningen är planerat att tas i drift 2023 och ska vid full kapacitet återvinna 125 000 ton batterier per år, vilket inkluderar produktionsspill från Northvolts egen verksamhet. Det som kommer återvinnas är litium, nickel, mangan, kobolt, koppar samt aluminium (som minskar behovet av bauxit) och plast (som inte är en del av den här studien). Det verkar inte finnas några planer på att återvinna grafiten (DI, 2021; Northvolt, 2021a). Det framgår inte hur deras process kommer ta hand om elektrolyten som innehåller en del fluor, men det kan tänkas att fluoret går att få ut i en form som kan minska behovet av flusspat.

Ovako: Ovako återvinner en betydande mängd av svenskt fraggskrot. I deras hållbarhetsrapport (Ovako, 2021a) så säger de att de återvinner ca 800 000 ton skrot per år. Hur mycket av det som är inom Sverige framgår dock inte. Det nämns att deras produkter har ett återvunnet innehåll på 65–88 % (medel 76,2 %) från uttjänta produkter och 10–30 % (medel 21 %) från industrispill, men det syftar i huvudsak på järninnehållet (Ovako, 2021b). Deras stålprodukter innehåller mer än 97,2 % återvunnet material, men om man bara tittar på järninnehållet så är det 99,2 % återvunnet material från industrispill och uttjänta produkter. Med andra ord så är det en betydligt lägre andel återvunnet material i form av legeringsämnen som inkluderas i den här studien. De har ett par miljövarudeklarationer som säger hur innehållet av nickel, krom, molybden, mangan och kisel varierar mellan de huvudsakliga legeringarna från deras tre största anläggningar, varav två i Sverige (Ovako, 2019; Ovako, 2020a; Ovako, 2020b). Det är svårt att göra en totalskattning av hur mycket det är eftersom det inte framgår hur mycket som produceras på varje ställe, eller vad stålen innehåller i snitt. Utifrån dessa siffror och en lång rad antaganden så går det att säga att Ovako troligtvis återvinner något i storleksordningen av 100-tals till 1 000-tals ton av de olika legeringsämnena kisel, krom, nickel, mangan och molybden varje år. Av dessa ämnen så har kisel högst oxidationsbenägenhet och därmed störst risk att hamna i slagget, vilket gör att den faktiska återvinningen eventuellt är lägre för just kisel.

Sandvik Coromant: Tillverkar och säljer verktyg för skärande bearbetning. De samlar även in och tar emot ”alla solida hårdmetallspetsar – oavsett tillverkare och ursprung”. Det verkar som att spetsarna skickas till Wolfram Bergbau und Hütten AG i Österrike, där volfram återvinns i en process som även hanterar primära råmaterial från gruvor. Övriga legeringsämnen tas också om hand och säljs vidare till andra aktörer. De säger bland annat att kobolt skickas till ”världens största producent av kobolt” vilket skulle kunna tolkas som Glencore. Sandvik Coromant använde 2018 ca 200 ton kobolt, där 65–75 % bestod av återvunnen kobolt. Hur mycket av det som användes inom Sverige och hur mycket som går tillbaka till återvinning via dem framgår dock inte. De erbjuder också rekonditionering där verktygen skickas till ”rekonditioneringscentra i Europa, Asien och Amerika”, vilket eventuellt innebär att de skickas utanför Sverige för rekonditionering och sedan återvänder till Sverige igen för återanvändning. De har en produktionsenhet i Gimo där de tillverkar ”extremt hårda skär”, men det framgår inte om det sker

någon återvinning där (Sandvik Coromant, 2021; Wolfram Bergbau und Hütten, 2021).

Stena Aluminium: På Stena Aluminiums smältverk i Älmhult produceras varje år cirka 70 000 ton aluminiumlegeringar från cirka 80 000 ton skrot. Råvaran utgörs av produktionsspill från industrin och uttjänta produkter såsom bilar och elektronik, men det framgår inte hur stor andel som kommer från uttjänta produkter. Den aluminiumoxid som bildas i processen, det vill säga slaggen, skickas till Tyskland för återvinning inom cementindustrin. Både återvinningen av aluminium och aluminiumoxid minskar behovet av jungfrulig bauxit. Det framgår inte hur mycket av diverse legeringsmetaller som återvinns, men det framgår att deras legeringar bland annat innehåller kisel, koppar, mangan, magnesium, nickel, titan och strontium. De säger själva att 100 % av aluminiumlegeringen är från återvunnet material, men det är ändå tveksamt om det även inkluderar alla legeringsämnen (Stena Aluminium, 2017; Stena Aluminium, 2022a; Stena Aluminium 2022b). Det går till exempel att utläsa från European Commission (2020c) att det inte sker någon funktionell återvinning av kiselmetall i aluminiumlegeringar.

Stena Recycling: Har beviljats stöd från Energimyndigheten för investeringar i en ny anläggning för återvinning av batterier. Planen är att anläggningen ska vara i gång i början av 2023 och ska kunna hantera 10 000 ton batterier, vilket bland annat inkluderar litiumjonbatterier. (Stena Recycling, 2022) Det kan sättas i jämförelse med den plan som Northvolt har för 125 000 ton litiumjonbatterier.

Umicore: En stor aktör inom ett flertal kritiska råmaterial. De har sin huvudverksamhet i Belgien, vilket alltså är utanför den här studien men deras verksamhet ger ändå en viktig indikation av vilka material och produkter som är värda att återvinna. De har en anläggning i Karlskoga, men det verkar inte som att det sker någon återvinning där, endast tillverkning av det aktiva materialet för fordonskatalysatorer (Umicore Autocat Sweden, 2021). Från vad som går att utläsa från deras hemsida (Umicore, 2021) så återvinner de huvudsakligen produktionsspill och industriellt avfall från många olika branscher som har lite udda material. De uttjänta produkter som ingår i deras portfölj är:

- NiMH-batterier (Ni, Co, Mn, Nd, Pr, Ce, La) och litiumjonbatterier (Li, Ni, Co, Mn, Cu). De säger att ”Umicore is closing the loop for lithium” så det verkar som att litium återvinns från deras pyrometallurgiska process för batteriåtervinning. Anläggningen i Hoboken är anpassad för att hantera 7 000 ton batterier (NiMH och Li-jon) vilket kan sättas i jämförelse med de 125 000 ton som Northvolt planerar.
- Fordonskatalysatorer (Pt, Pd, Rh).
- Elektronik (Cu, Ni, Pd, Sb). De hanterar även vismut, gallium och tantal, men det är svårt att säga om de får ut det från elektroniken eller ej.
- Olika legeringsmetaller från skrot.

- Industriellt konsumtions-avfall i form av exempelvis katalysatorer och *Membrane Electrode Assembly* (MEA) ur bränsleceller.

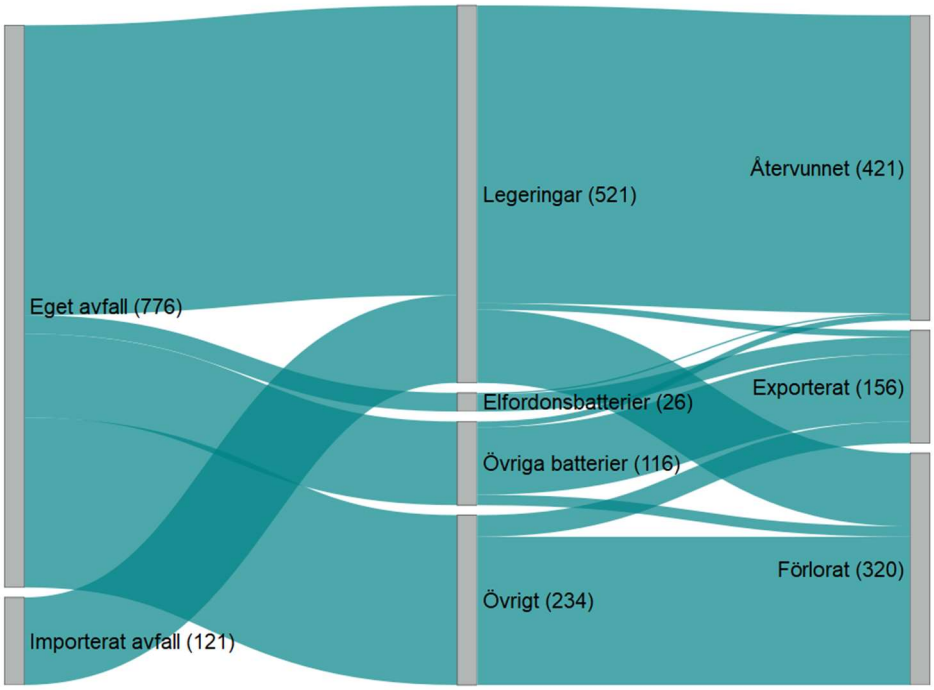
Umicore hanterar även koncentrat av olika ämnen som uppstår i återvinningen av uttjänta produkter. Sådana material skulle exempelvis kunna vara palladium-koncentrat, antimonslagg eller vismutrik blydross från Boliden eller PGM-koncentrat från Arc Metal. De borde även kunna hantera den svarta massan från alkaliska batterier då den innehåller betydande mängd zink och mangan, men även en del indium. Alla tre ämnena är sådant som Umicore säljer, men det framgår inte från någon text hur de hanterar detta material. Från European Commission (2020c) går det att utläsa att Umicore har varit med och utvecklat någon teknik för att återvinna sällsynta jordartsmetaller från lysfosfor från lysrör och lågenergilampor men att den verksamheten avbröts på grund av dålig lönsamhet. Det går inte heller att hitta dessa metaller i deras portfölj (förutom cerium som även finns i NiMH-batterier) vilket styrker teorin att det antagligen inte är lönsamt i och med övergången till LED-lampor.

Veolia Recycling Solutions: Har en anläggning i Hovmantorp för återvinning av ljuskällor i form av lysrör, lågenergilampor (CFL) och högintensiva gasurladdningslampor. Gemensamt för dessa ljuskällor är att de alla innehåller (eller kan innehålla) kvicksilver som tas hand om i Veolias process. Ljuskällorna har även ett lyspulver som innehåller flera kritiska råmaterial, däribland fosfor och ett flertal sällsynta jordartsmetaller. Utifrån litteratur (Tunsu, 2014, Patil, 2021) så borde 1 kg av pulvret innehålla följande ämnen: 4,1 mg cerium, 4,3 mg europium, 2,4 mg gadolinium, 4,4 mg lantan, 42,4 mg fosfor, 1,2 mg antimon, 3,4 mg strontium, 1,9 mg terbium och 80,4 mg yttrium. Veolia säger själva på sin hemsida att lysrören och CFL-lamporna består till ca 5% av lyspulver (Veolia, 2022). De säger också att ”[u]r pulvermixen återvinns kvicksilver och sällsynta jordartsmetaller”. De hanterar ljuskällor från Sverige och Norge, vilket gör att det borde gå att uppskatta mängden, men det finns ingen information från deras hemsida som berättar vilka totala mängder ljuskällor som återvinns och det har inte kartlagts ytterligare i den här studien. Det forskades på återvinning av sällsynta jordartsmetaller från CFL-lampor i början av 2010-talet, antagligen på grund av prishöjningen på REE omkring 2011 och att det då var väldigt vanligt med CFL-lampor. Nordic Recycling hade ett Vinnova-projekt om just utvinning av sällsynta jordartsmetaller från CFL-lampor (Vinnova, 2017). De köptes senare upp av Veolia som nu borde ha kunskapen. De säger alltså att de återvinner sällsynta jordartsmetaller, men det framgår inte huruvida de återvinner det till rena metaller eller om det skickas vidare till någon annan aktör för förädling. Det framgår inte heller om det är lönsamt att återvinna sällsynta jordartsmetaller från CFL. En litteratursökning (på engelska) efter återvinnare av sällsynta jordartsmetaller från CFL-pulver resulterade endast i forskningsresultat, inga resultat som tyder på att någon i världen återvinner materialet. På motsvarande sätt som för Umicore så är det troligtvis inte lönsamt att återvinna lyspulvret och mängden sällsynta jordartsmetaller som återvinns från pulvret kommer troligtvis minska med tiden i och med en övergång till LED-lampor.

Kvantitativa skattningar för kobolt

Dagens sekundära flöden och återvinning

Kobolt är en kritisk metall som förväntas vara en viktig komponent i den svenska energiomställningen, bland annat i litiumjonbatterier för elfordon. Figur 5 visar de flöden av kobolt från uttjänta produkter som identifierats i den här studien. Värdena är skattningar av flöden från 2020, eller så nära 2020 som är möjligt. Anmärkningsvärt är att det mesta av avfallet än så länge kommer från legeringar och övrigt (däck, färg, katalysatorer med mera). Så gott som all återvinning inom Sverige ser än så länge ut att gå från legeringar till legeringar.



Figur 5. En skattning av sekundära flöden av kobolt från uttjänta produkter i Sverige år 2020. Alla redovisade värden är ton kobolt per år.

Sekundär kobolt finns i legeringar i metaller där användningen är ca 500 ton/år (SGU, 2021). I brist på information om hur mycket som faktiskt blir avfall så gjordes ett antagande att 80 % av flödet blir avfall. Import och export av skrot (legeringar) gick att hitta data för under kategorin ”Avfall och skrot av kobolt” i SCB:s statistik (SCB, 2021a; SCB, 2021b), där den rena kobolt-halten antas vara 90 %.

Sekundär kobolt från *elfordonsbatterier* har i dagsläget tagits från en skattning av avregistrerade fordon från dagens nyregistrerade fordon i Sverige. Fordonen använder NiMH eller Li-jon. Flödet från denna kategori inkluderar elcyklar, personbilar (BEV, PHEV och HEV) och elbussar. Batterierna i elfordonen har variationer i batterikemier och därmed andelar av olika metaller. Batterikemierna kan bero på flera faktorer som exempelvis fordonets modell, produktionsår och

tillämpning. Alla HEV från avregistrerade personbilar antas innehålla NiMH med 1,5 kWh batterikapacitet och alla andra personbilar (BEV och PHEV) och elbussar antas vara Li-jon. Batterier för PHEV antas vara 5 kWh batterikapacitet av typen NMC111, för BEV 22 kWh av typen NMC111 och för elbussar 264 kWh av typen NMC622. För att beräkna metallmaterial per kilowattimme användes data från Larsson et al. (2013) och Dai et al. (2018).

För att approximera antalet batterier från HEV så antogs livslängden för alla fordon vara 15 år och därmed togs statistik för nyregistrerade fordon från 2006 som representativt för uttjänta fordon i dagsläget (Bil Sweden, 2021; Trafikanalys, 2021). För elcyklar antogs livslängden på batteriet vara 3,5 år och cykelns livslängd vara 7 år, alltså med ett batteribyte under cykelns livslängd (Miljöbarometern 2030, 2020). För elbilar, pluginhybrider och elbussar var det svårare att ansätta en livslängd för att realistiskt kunna spegla verkligheten, så där antogs i stället att antalet som blev uttjänta motsvarades av 5 % av såld mängd 2020.

Sekundär kobolt från *övriga batterier* kommer från portabla litiumjonbatterier och nickelbaserade (NiMH och NiCd) batterier. För portabla litiumjonbatterier gick det att hitta data för ett beräknat avfallsflöde i EU från Circular Energy Storage (CES, 2021). Det flödet skalades ner till en svensk motsvarighet utifrån BNP (3,5 % av EU:s BNP). För portabla NiMH- och NiCd-batterier användes statistik för batterier som samlats in via batteriinsamlingen (SCB, 2020e) där alla batterier antogs vara portabla. För att beräkna metallmaterial per kilowattimme eller kilogram användes data från Agrawal et al. (2010), Larsson et al. (2013) och Dai et al. (2018).

Kobolt återvinns selektivt ur batterier då värdet är högt relativt de andra batterimetallerna. I Sverige så smälts i dagsläget 10 ton kobolt per år för återvinning som legeringar (SGU, 2021) och ett antagande görs att 20 % av dessa kommer från fordonsbatterier och 80 % från övriga batterier. Mängden förlorad kobolt ur batterier kommer från plockanalyser av hushållsavfall (Avfall Sverige, 2016) och återigen egna antaganden om mängden batteri av olika typer. Det antogs att så gott som ingen kobolt går förlorad från elfordonsbatterier. Mängden exporterad kobolt från batterier är i det här fallet taget från balansen mellan mängden uttjänta batterier, vad som återvanns i form av legeringar och vad som gick förlorat i hushållsavfallet. I mängden exporterad kobolt är det fullt möjligt att det även ingår en hel del upplagrat, dels i hemmen hos privatkonsumenter, dels hos skrothandlare och andra industriella aktörer.

Mängden *övrigt* baseras på EU-konsumtion (European Commission, 2020c), vilket skalades ner till en svensk motsvarighet och det antogs att mängden avfall motsvaras av 80 % av konsumtionen. Där antogs att hälften av katalysatorerna går till återvinning via export och att resten går förlorat.

Ur SCB:s statistik för import och export (SCB, 2021a; SCB, 2021b) går det även att utläsa att Sverige nettoimporterar ca 200 ton kobolt från både primär och sekundär råvara för framställning av legeringar, vilket återigen baseras på antaganden om koboltkoncentrationen i olika varor och om vart de går. Allt utom

klorider, acetater och sulfater antas gå till legeringar. Om användningen är 500 ton kobolt per år för framställning av legeringar så borde resten komma från återvunnet, varav 10 ton från batterier. Här är det dock mycket osäkra siffror, baserat på många antaganden i flera led, men borde ge en ungefärlig skattning av i vilken storleksordning det ändå är. Resterande mängd kobolt från legeringar antas gå förlorat.

Rimlighetsbedömning av uppskattade mängder

Exporten av kobolt i batterier är svår att uppskatta. En osäkerhetskälla är att statistiken inte redovisas på batteri-kemi, utan endast som den totala mängden batterier. Variationerna i koboltmängden i olika batterier gör att det endast går att ge en approximation med stor osäkerhet. Batterier som sitter i utrustning när de säljs/exporteras/samlas in är också svår att utläsa ur statistiken, speciellt för flöden av mindre batterier.

Förlorad mängd koboltlegeringar är således också väldigt osäker. Det är oklart hur mycket kobolt som finns i form av legeringar och som blir avfall. Ett antagande om 400 ton gjordes här, det vill säga 80 % av producerad mängd, vilket baseras på en grov skattning av ungefär hur snabbt konsumtionen av stålprodukter ökar jämfört med hur snabbt de blir avfall. Som exempel så skrotades det 10 % färre personbilar 2020 än vad som registrerades samma år (Bil Sweden, 2021, Trafikanalys, 2021). Samtidigt så har tjänstevikten för fordon ökat med 13 % för fordon registrerade 2020 jämfört med de som registrerades 2008 (Gröna Bilister, 2021). Om alla personbilar som skrotades 2020 hade en genomsnittlig tjänstevikt som motsvarar de som registrerades 2008 så innebär det att den totala skrotade vikten av personbilar 2020 är 80 % av vad som registrerades samma år.

Förlorad mängd kobolt från legeringar är baserat på differensen mellan uppkommet och återvunnet avfall. På ett liknande sätt så är också exporterad mängd kobolt från batterier baserad på balansen mellan avfallsmängd och återvunnet samt förlorat. Det gör att eventuella fel i ett flöde påverkar den totala balansberäkningen.

Vi har varit tvungna att göra många antaganden om ungefärlig kobolthalt i flera material som importeras och exporteras och har inga uppgifter på import/export av legeringar med låg halt kobolt, eftersom det drunknar i mängden stål utan kobolt.

Identifierade dataluckor

Nationella data för litiumjonbatterier var inte tillgängliga för alla kategorier i hög upplösning, vilket är anledningen att europeiska data användes i stället. BNP-förhållandet mellan Sverige och Europa användes för att beräkna en rimlig mängd av batterier som fanns i uttjänta produkter för Sverige.

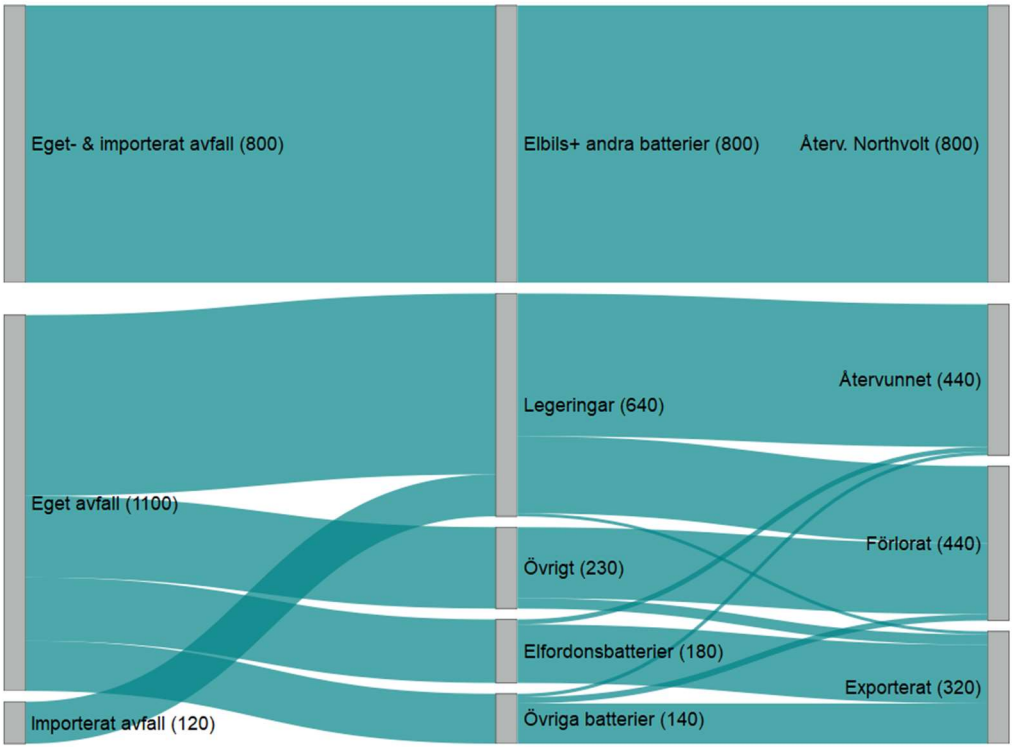
Tillgänglig statistik för avregistrerade eller skrotade fordon inkluderar i dagsläget endast personbilar, utan någon information om drivlina (BEV, PHEV, HEV eller förbränningsmotor). Skrotningsstatistiken inkluderar inte heller några data för tyngre fordon, så som lastbilar och bussar, eller lättare fordon som elcyklar och elmopeder.

Tillgänglig statistik för uppkommet och behandlat avfall är för grovt uppdelat för att det ska gå att utläsa några mängder kobolt. Metallavfall är till exempel endast uppdelat på ferromagnetiskt och icke ferromagnetiskt, vilket gör att mängden kobolt fullständigt drunknar i mängden av övrigt skrot. Dessa data kan vara värt att gräva djupare i vid eventuellt fortsatta studier på området.

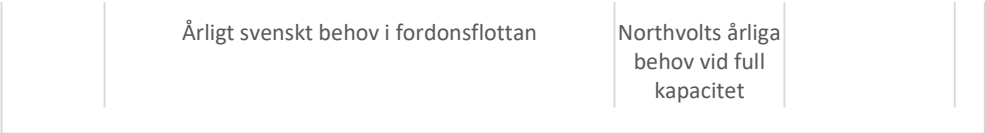
Halten kobolt i olika material och produkter saknas i all form av statistik som går att hitta. Därför har halterna antagits, när det har varit möjligt baserat på information i litteraturen. Halten kobolt i en typ av produkt kommer dessutom i många fall variera från år till år, vilket är något som hade varit önskvärt att ta i beaktande men var svårt att ta hänsyn till då data från litteraturen endast inkluderar ett fåtal analyser av en begränsad mängd material vid något enstaka tillfälle. Det närmaste som gick att komma här var att ge en skattning av batterikemin i olika fordon, vilket till stor del baserades på skattning av fordonens livslängd.

Prognosticerad utveckling

Elektrifieringen av transportsektorn och energisystemet kommer bidra till en stor ökning av litiumjonbatterier som används i Sverige. Detta speglas även i ökningar av Sveriges produktions och återvinningsvolymer av litiumjonbatterier. Figur 6 visar prognostiserade uttjänta produkters volymer för 2030 för Europa (CES, 2021), skalat till Sverige, och som inkluderar hur stora de planerade ändringarna i Sveriges batteriindustri förväntas bli (DI, 2021).

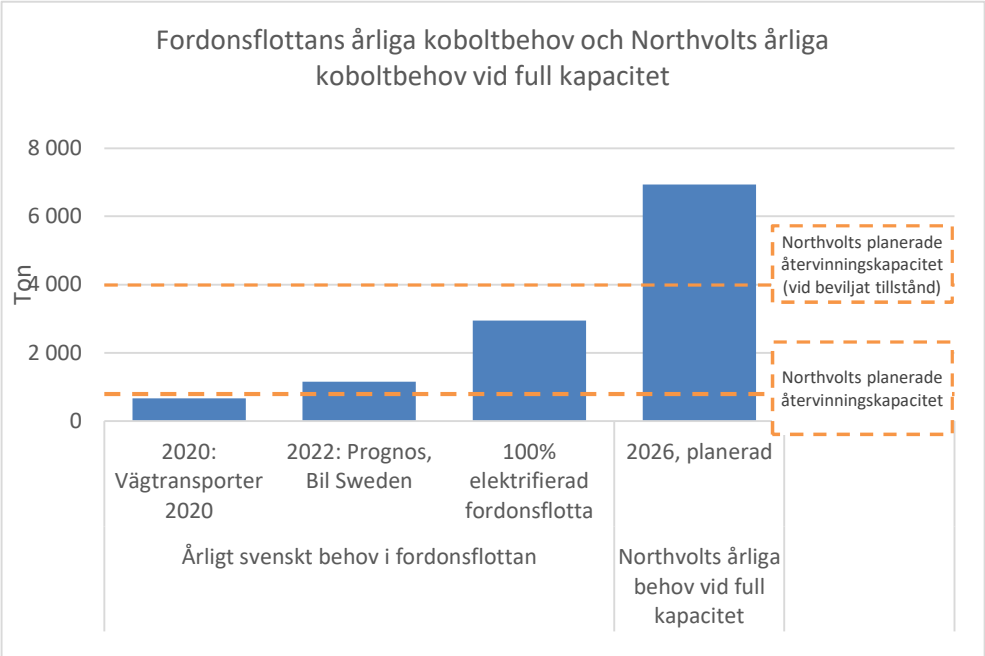


Figur 6. Skattade årliga flöden av kobolt (ton) för 2030. ”Elbils+ andra batterier”= Elbilsbatterier och andra batterier. ”Återv. Northvolt”=Återvunnet material från Northvolt.



Figur 7. Dessa siffror kommer från de referenser som redovisas i avsnittet Litteraturstudie ovan. Koboltmängden har räknats fram från batterivolymerna med de andelar av de olika batterikemierna som kommer finnas 2030 enligt Circular Energy Storage (2021). I detta scenario har inflödet av batterier avsiktligen behållits ospecifikt eftersom det är oklart vad detta flöde kommer bestå av. Det kan troligtvis innehålla uttjänta batterier från avregistrerade elfordon i Sverige, andra inbördes batteri-källor och resterande volymer skulle kunna importeras för att fylla på brister i kapaciteten på batteriåtervinningen. Produktionsspill från Northvolt (och andra anläggningar) kan också utgöra en del av inflödet, men notera att detta flöde inte är inräknat i Figur 6.

Utöver ändringar i användningen av batterier och inom produktions- och återvinningsindustrierna så bör innovation inom energilagring inkluderas. Det finns möjligheter till förändringar i material och tekniker som kan ha varierande effekter på framtidens flöde, men eftersom infrastrukturen behöver anpassas och produktens livslängd är så lång så har skiften i tekniken en lång väntetid innan de blir sekundära råvaruflöden.



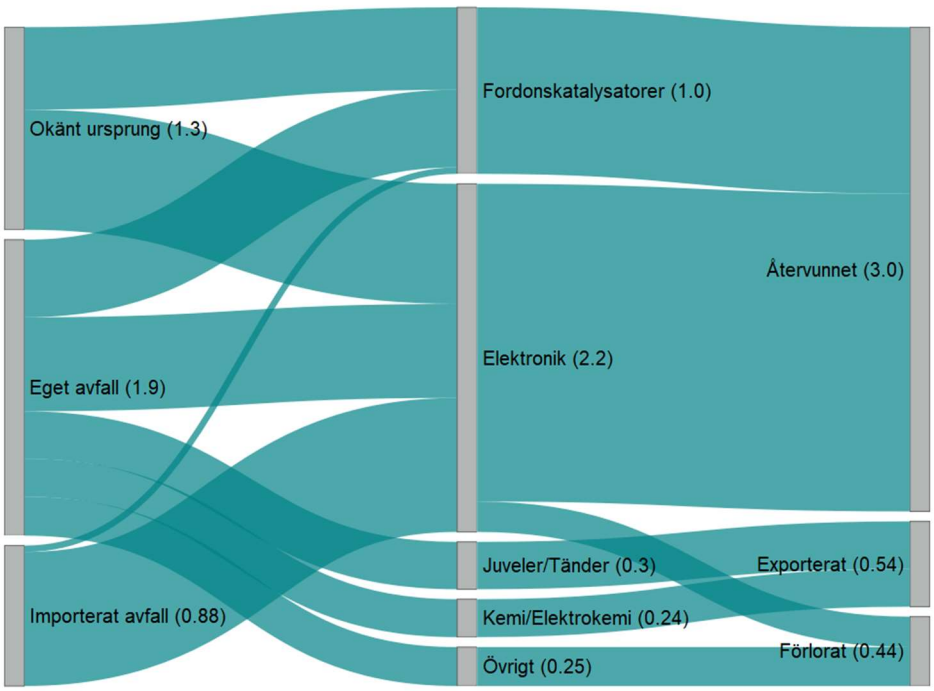
Figur 7. Årliga koboltbehov för dels den svenska fordonsflottan, dels Northvolts batteriproduktion vid full kapacitet. Northvolts planerade återvinningskapacitet illustreras som jämförelse. Bil Swedens prognos för 2022 togs ur (https://www.bilsweden.se/statistik/prognos-nyregistreringar). Scenariot för 100 % elektrifierade fordonsflottan antar samma antal lätta och tunga

fordon som i 2020. Observera att det finns behov av kobolt för fler applikationer än fordonsflottan samt att Northvolt planerade produktion inte kommer att begränsas till enbart den svenska fordonsflottan.

Kvantitativa skattningar för platinagruppmetaller

Dagens sekundära flöden och återvinning

Platinagruppmetaller skulle kunna vara kritiska för svensk energiomställning då de bland annat används inom elektrolysörer för vätgasframställning och i bränsleceller. Figur 8 visar de flöden av platinagruppmetaller från uttjänta produkter som identifierats i den här studien. Värdena är skattningar av flöden från 2020, eller så nära 2020 som är möjligt. Elektrolysörer och bränsleceller är än så länge en ytterst liten del och inkluderas i det som kallas kemi/elektrokemi. Det mesta av avfallet kommer, än så länge, från fordonskatalysatorer och elektronik. De två stora återvinnarna av dessa kategorier, Arc Metal och Boliden, verkar än så länge inte återvinna några rena metaller. I stället så skapar de ett koncentrat som sedan skickas utomlands för ytterligare raffinering, men det illustreras ändå som återvunnet i Figur 8.



Figur 8. En skattning av sekundära flöden av platinagruppmetaller från uttjänta produkter i Sverige år 2020. Alla redovisade värden är i form av ton platinagruppmetaller per år.

Den största användningen av platinagruppmetaller i dagsläget är i form av *fordonskatalysatorer*, men det sekundära flödet är betydligt mindre än användningen. Hälften av PGM-flödet av fordonskatalysatorer (0,5 ton) kommer från eget avfall. Beräkningarna utgår från antalet avregistrerade personbilar samt

en skattning av antalet avregistrerade lastbilar och bussar. Antalet avregistrerade bussar och lastbilar fanns inte tillgängligt så där antogs att förhållandet mellan nyregistrerade och avregistrerade år 2020 är det samma som det är för personbilar, det vill säga 90 % (Bil Sweden, 2021, Trafikanalys, 2021). Uttjänta katalysatorer från personbilar och lätta lastbilar antas ha en genomsnittlig mängd platinagruppmetaller på 2 gram per katalysator (Wiecka et al., 2022). Storleken på katalysatorer från bussar och tunga lastbilar antas vara 10 ggr större (20 gram per katalysator). Värt att notera är att halten platinagruppmetaller i en förbrukad katalysator är lägre än halten i exakt samma katalysator innan den började användas, då en del lossnar under användningen och lägger sig som ett damm längs med våra vägar. Dessutom är antalet registrerade fordon fler än vad som avregistreras varje år och kraven på katalytisk rening har gått upp med tiden. Alla dessa faktorer bidrar till att det sekundära flödet av platinagruppmetaller från fordonskatalysatorer är betydligt lägre än användningen av detsamma.

Mängden återvunnet platinagruppmetaller (1,0 ton PGM) från fordonskatalysatorer har skattats utifrån den omsättning som Arc Metal redovisat 2020 (Bolagsfakta, 2021) och ett antaget värde av 300 000 kr/kg PGM i deras sålda material. Det värdet motsvarar ungefär 2/3 av den rena metallen år 2020, om den rena metallen är 75 % platina och 25 % palladium. Antagandet 2/3 av priset för ren metall utgår från att det inte är ett rent material och förhållandet 75/25 av platina/palladium utgår från en någorlunda trolig sammansättning av platinagruppmetaller i katalysatorerna. Mängden importerade platinagruppmetaller från uttjänta fordonskatalysatorer har beräknats utifrån importdata för platinaskrot, med KN-kod 71129200[1], där det framgår att det importerades ca 15 ton platinaskrot till ett värde av ca 2,7 miljoner kr under 2020 (SCB, 2021a). Om importerat platinaskrot har en genomsnittlig halt på 2 700 g PGM/ton, vilket skulle motsvara det keramiska materialet från uttjänta katalysatorer (Wiecka et al., 2022), så skulle det motsvara 0,04 ton platinagruppmetaller. Eftersom summan av importerat och eget avfall är lägre än vad som beräknats bli återvunnet så återstår det ca 0,5 ton platinagruppmetaller från okänt ursprung.

Inom projektet gjordes olika uppskattningar av mängden platinagruppmetaller från *elektronik*, vilket redovisas under rimlighetsbedömningen av uppskattade mängder. Den mängd som syns i Figur 8 utgår från information från El-kretsen (2019) som säger att de samlar in ca 80 000 ton/år (åren 2018–2019) av ”diverse elektronik”, vilket är ett material som enligt dem innehåller ca 0,0005 % (5 ppm) palladium. Det skulle motsvara 0,4 ton palladium och utifrån de siffror som redovisas från El-kretsen för övriga material så är det troligtvis inga stora mängder palladium i det

[1] Avfall och skrot av platina, inklusive metall med pläterring av platina, och annat avfall och skrot innehållande platina eller platinaföreningar av sådana slag som huvudsakligen används för återvinning av ädla metaller (exklusive aska innehållande platina eller platinaföreningar, avfall av platina nedsmält till obearbetade block, tackor eller liknande former samt guldsmedssopor innehållande andra ädla metaller).

övriga material som de samlar in. Den förlorade mängden palladium från elektronik utgår från plockanalyser av hushållsavfall (Avfall Sverige, 2016) samt egna antaganden om halten palladium i det materialet. Utöver det så antas även att halten rutenium i elektroniken är 30 % av mängden palladium, vilket enligt data för EU/global konsumtion (European Commission, 2020c) skulle motsvara förhållandet mellan rutenium och övriga platinagruppmetaller i konsumerad elektronik. Mängden rutenium antas finnas i en annan del av elektroniken än vad som går till återvinning via Boliden och går därför förlorade i en icke-funktionell återvinning. Rutenium förväntas hittas i elektriska kontakter och till viss del i hårddiskar. Palladium förväntas hittas i kondensatorer och integrerade kretsar som sitter fast på kretskort.

Från SCB:s statistik (SCB, 2020f) över insamlad mängd elutrustning, med egna antaganden om mängd kretskort per materialkategori (vilket redovisas ytterligare längre ner under rimlighetsbedömningen av uppskattade mängder), så går det även att utläsa att insamlad mängd kretskort de senaste åren motsvarar ungefär två tredjedelar (67 %) av vad som såldes samma år. Det varierar dock kraftigt mellan åren men ger en uppskattning av hur mycket palladium som förloras och eventuellt ackumuleras hos konsumenterna varje år i form av elektronik (kretskort i produkter). En undersökning från reBuy (2022) säger att svenskar har i snitt 1,31 mobiltelefoner/capita som ligger oanvända hemma, det vill säga 13,5 miljoner mobiltelefoner. Dessa motsvarar ca 0,2 ton palladium (Tesfaye et al., 2017). Ackumulerad mängd platinagruppmetaller är inte inkluderad i Figur 8.

Mängden återvunna platinagruppmetaller från elektronik kommer från Boliden, där siffror från deras årsrapport säger att de producerar ca 2 ton palladiumkoncentrat varje år (Boliden, 2021a). Sammansättningen av detta koncentrat ser ut att bestå nästan uteslutande av palladium enligt de säkerhetsblad som går att hitta (Boliden, 2021b). Det faktum att inga av deras svenska malmer ser ut att innehålla några platinagruppmetaller och det faktum att koncentratet innehåller väldigt små mängder av andra metaller än just palladium säger att det troligtvis nästan uteslutande kommer ifrån återvunnen elektronik, det vill säga ca 2 ton palladium per år.

Importerad mängd elektronik är baserad på data från Naturvårdsverket (2021) som säger att Sverige importerade ca 50 000 ton elektronikavfall/år under åren 2010–2019. Det verkar som att det var lite mindre under de första åren och lite mer under de senare åren, så det antas att ca 60 000 ton importerades 2020. Mest elektronikavfall importerades från Norge, Danmark, Finland och Island. Den totala mängden elektronikavfall från dessa fyra länder var så stor att det är rimligt att anta att den inkluderar så gott som alla insamlade kretskort. Mängden palladium i dessa kretskort antas vara 0,8 ton, baserat på att dessa fyra länder tillsammans har nästan dubbelt så hög BNP som Sverige och Sveriges elektronikskrot innehåller ungefär 0,4 ton palladium. Övriga länder som vi importerat elektronikskrot från skulle vi i så fall kunna anta skickar bara det värdefullaste, det vill säga endast kretskort. Om det materialet har en palladium-koncentration på 100 ppm så skulle det motsvara ungefär 0,06 ton palladium per år. Detta scenario har inkluderat de högsta siffror

som vi använder i våra antaganden, både från eget avfall och importerat avfall. Det blir ändå nästan 0,8 ton palladium med okänt ursprung, som är elektronik. Antingen så har det skrotats mer elektronik än vad som framkommer från de siffror som vi har använt oss av eller så har det importerats material som har sitt ursprung från elektronikskrot men som ändå inte klassats som avfall och därmed inte syns i statistiken för avfall. Därför har det i Figur 8 även inkluderats ett flöde från okänt ursprung som går till återvinning i Sverige.

Sekundära flöden av platinagruppmetaller från *juveler/tänder*, *kemi/elektrokemi* och *övrigt* utgår från mängden en omräkning från EU-konsumtion eller global konsumtion (European Commission, 2020c) till motsvarande svensk konsumtion baserad på BNP. Avfallsmängden antas vara 80 % av konsumtionen. Dessa flöden är i själva verket okända men de har troligtvis ett högt värde och flödena från i alla fall juveler/tänder samt kemi/elektrokemi borde vara relativt enkla att samla in. Därför har det antagits att de två flödena säljs vidare, vilket i det här fallet innebär att de går på export. I brist på bättre information så antogs det att mängden övrigt gick förlorad.

Rimlighetsbedömning av uppskattade mängder

Antalet fordonskatalysatorer är troligtvis en säker information, men halten platinagruppmetaller per katalysator är mer osäker. Halten platinagruppmetaller kan variera kraftigt beroende på tillverkare och tillverkningsår. Litteraturuppgifter säger att det är cirka 2 gram per uttjänt/skrotad katalysator i snitt (Wiecka et al., 2022). Halten platinagruppmetaller i katalysatorer från tunga fordon är antaget utifrån att tunga lastbilar drar cirka 10 gånger mer bränsle per mil än vad en personbil gör. Om halten platinagruppmetaller i katalysatorer från tunga fordon också hade varit 2 gram per katalysator (det vill säga att halten 2 gram är ett medelvärde som inkluderar tunga så väl som lätta fordon) så skulle det motsvara 0,1 ton mindre platinagruppmetaller från eget avfall i Sverige, vilket samtidigt innebär 0,1 ton mer från okänt ursprung. Om vi i stället hade utgått ifrån EU-konsumtion och global konsumtion av platinagruppmetaller (European Commission, 2020c) så skulle det motsvara 3,5 ton PGM/år, vilket är betydligt högre än de 0,5 ton platinagruppmetaller som redovisas i Figur 8. Konsumtionen förväntas dock vara högre än vad som faktiskt blir avfall, dels för att kraven på katalytisk rening är högre på nyproducerade fordon jämfört med äldre, dels för att antalet registrerade fordon är högre än antalet avregistrerade/skrotade, men även för att en del platinagruppmetaller försvinner under användningsfasen.

Mängden återvunna platinagruppmetaller från Arc Metal är väldigt osäker då det endast baseras på företagets omsättning. Vi har inte undersökt vad deras intäkter baseras på. Om deras intäkter exempelvis till stor del baseras på att de smälter ner material åt någon annan och bara tar en provision på tjänsten så blir resultatet ett helt annat. För att få säkrare uppgifter i en eventuellt framtida studie så måste denna uppgift styrkas exempelvis via en intervju med någon representant från företaget.

Den importerade mängden fordonskatalysatorer baseras på importdata. Denna statistik visar att det importerades ca 15 ton platinaskrot till ett värde av ca 2,7 miljoner kr under 2020. Om vi i stället hade utgått från värdet av platinagruppmetaller i skrotet, med samma antagande om 300 000 kr/kg PGM som för Arc Metals återvinning, så skulle det motsvara knappt 0,01 ton platinagruppmetaller. Ett lägre skrotpris resulterar i en större mängd platinagruppmetaller, vilket är troligt i det här fallet eftersom det inte skulle importeras för återvinning om det kostar lika mycket som det sedan är värt efter återvinningen. En kontroll mot importdata av katalysatorer som eventuellt innehåller platinagruppmetaller (KN-kod 38151200[2] och 71151000[3]) säger att det importerades ca 206 ton katalysatorer till ett värde av ca 78 miljoner kr under 2020 (SCB, 2021b), vilket skulle kunna resultera i så mycket som 0,6 ton platinagruppmetaller om det materialet innehåller 2 700 g PGM/ton katalysator. Det är inte helt omöjligt att en del av det okända flödet av platinagruppmetaller från fordonskatalysatorer gömmer sig i den här importen.

Återvunnen mängd palladium från Boliden är relativt säkert då det kommer direkt från deras egen årsrapport, men det är en avrundad siffra så mängden kan vara någonstans mellan 1,5 och 2,5 ton palladium under år 2020. Utifrån de senaste tio årens produktion (2011–2020) så är det troligt att mängden palladiumkoncentrat är mer än 2 ton/år. Av dessa tio år så är det två år som resulterat i 3 ton palladium-koncentrat och åtta år som resulterat i 2 ton palladium-koncentrat (snitt på 2,2 ton/år utifrån avrundade siffror). De säkerhetsdatablad som beskriver deras palladiumkoncentrat tyder på att vårt antagande om att rutenium ligger i någon annan del av elektroniken troligtvis är korrekt, eller så har halten rutenium i elektronik kraftigt missbedömts utifrån global konsumtion (European Commission, 2020c). Mängden förlorad rutenium är dock osäker då det baseras på antaganden samt avsaknad av information om hur det materialet eventuellt tas om hand.

Mängden palladium från eget avfall i form av elektronik baseras på uppgifter från El-kretsen och det är lite osäkert hur pass tillförlitliga de uppgifterna är, då El-kretsen själva inte utvinner palladium ur materialet. Det är dessutom avrundade siffror som skulle kunna variera från 0,34 ton palladium (4,5 ppm, 75 000 ton) till 0,47 ton palladium (5,5 ppm, 85 000 ton) beroende på hur det avrundats. EU-rapporten om kritiska råmaterial (European Commission, 2020c) säger att ca 7 % av EU:s användning av palladium ligger i elektronik, vilket borde motsvara 0,15 ton palladium (0,26 ton PGM) om det skalas ner till svensk nivå baserat på BNP, vilket är betydligt lägre än de 0,4 ton palladium (0,6 ton PGM) som tagits med i Figur 8. Dessutom är det en jämförelse mellan vad som används och vad som blir avfall, vilket gör att skillnaden troligtvis är ännu större. Om vi i stället utgår från SCB:s statistik över insamlad mängd elutrustning så måste vi göra några

[2] Katalysatorer utfällda på en bärsubstans, med ädel metall eller föreningar av ädel metall som aktiv beståndsdel, i.a.n.

[3] Katalysatorer i form av trådduk eller trådnät av platina

antaganden om mängden kretskort och palladium i olika typer av utrustning. I ett försök att efterlikna de data som går att utläsa ur Tesfaye (2017) kan vi göra följande antaganden:

- IT- och telekommunikationsutrustning består till 10 % av kretskort, som innehåller 100 ppm palladium,
- hemutrustning och solcellspaneler (antas vara huvudsakligen hemutrustning) består till 1 % av kretskort, som innehåller 10 ppm palladium,
- all övrig elektronik och elektronisk utrustning består till 0,5 % av kretskort, som innehåller 5 ppm palladium.

Dessa halter resulterar i totalt 0,3 ton palladium, men är då till stor del baserade på egna antaganden. Med dessa jämförelser i åtanke så är det rimligt att anta att de siffror som använts (0,4 ton palladium) troligtvis stämmer till viss del trots allt, men är troligtvis inte en underskattning.

Importerad mängd elektronik är baserad på importdata av ett flertal avfallskoder (EWC-koder). Problemet där är, som för övriga flöden av platinagruppmetaller, att det är svårt att uppskatta koncentrationen av platinagruppmetaller i materialet. Problemet försvåras av att flera importer är rapporterade som en kombination av två eller fler avfallskoder. Samma slutsats drogs också i en nyligen avslutad kartläggning av flöden av småelektronik i Sverige (SMED, 2020). Det lättaste hade varit att anta att importerad mängd helt enkelt skulle vara balansen av övriga flöden, men när vi kontrollerade var avfallet kom ifrån så skulle det innebära orimligt stora mängder platinagruppmetaller från våra grannländer. De använder troligtvis inte mycket mer per person (eller per BNP) än vad vi gör i Sverige. Även när vi använder de största siffror som vi vågar anta så blir det ändå nästan 0,8 ton palladium från något okänt ursprung, vilket tydligt visar att det ligger någon osäkerhet i det här som inte identifierats.

De sekundära flödena av platinagruppmetaller från juveler/tänder, kemi/elektrokemi och övrigt är så gott som helt okänd och hanteringen av dessa flöden är också okända. Omräkningen från EU-konsumtion och global konsumtion (European Commission, 2020c) borde ge ett värde som är i ungefär rätt storleksordning, men utifrån övriga jämförelser som vi gjort mot dessa data så ser vi ibland stora skillnader mot våra beräkningar.

Den totala exporten av sekundära platinagruppmetaller är svår att uppskatta då vi inte vet under vilken kategori som Arc Metal och Boliden exporterar sitt material. En kontroll av exporterad mängd platinaskrot (KN-kod 71129200[4]) säger att det

[4] Avfall och skrot av platina, inklusive metall med pläterring av platina, och annat avfall och skrot innehållande platina eller platinaföreningar av sådana slag som huvudsakligen används för återvinning av ädla metaller (exklusive aska innehållande platina eller platinaföreningar, avfall av platina nedsmält

exporterades 312 ton platinaskrot till ett värde av 1 155 miljoner kr. Med en prisuppskattning på 300 000 kr/kg PGM, på samma sätt som vi antog vid återvinning av platinagruppmetaller från katalysatorer, så resulterar det i en export på 3,8 ton platinagruppmetaller. Om priset per kg platinagruppmetaller är något högre, till exempel för att Boliden återvinner framför allt palladium som år 2020 hade ett högre pris än platina, så resulterar det i en mindre mängd platinagruppmetaller. Summan av alla exporter av sekundära platinagruppmetaller som vi räknat fram, inklusive det material som återvinns, blir 3,6 ton. Det baseras på många antaganden men exportdata tyder ändå på att våra uppskattningar skulle kunna vara i rätt storleksordning i alla fall.

Identifierade dataluckor

Det har visat sig vara riktigt svårt att få fram data för vilka halter platinagruppmetaller som finns i olika materialflöden som det går att få fram statistik för. I fallet med uttjänta katalysatorer så fanns det litteraturdata att utgå ifrån. I fallet med elektronik så fanns det också litteraturdata, men det visade sig variera kraftigt mellan olika typer av elektronik där det var svårt att hitta tillräckligt detaljerade data för just vilken typ av elektronik som finns i avfallet. I andra fall var vi tvungna att utgå ifrån värdet av materialet, till exempel i export av platinaskrot och vid Arc Metals återvinning. Då värdet på materialet kan variera kraftigt beroende på halten av olika metaller samt föroreningar så var vi tvungna att utgå ifrån spekulationer.

I de import/export-data som går att få fram så finns det mycket lite information om de olika platinagruppsmetallerna, förutom i de få fall som de råkar importeras i ren form där det delas upp på platina, palladium och rodium var för sig samtidigt som iridium, osmium och rutenium buntas ihop. I dessa fall går det att få fram viktdata i form av gram, det vill säga inte bara ton, vilket resulterar i ca 0,4 ton import och 0,1 ton export per år, men materialet har troligtvis en PGM-halt som ligger en bra bit under 100 % om man tittar på det ekonomiska värdet av importen/exporten som är lägre än 300 000 kr per ton trots att en stor del av materialet består av andra (dyrare) metaller än platina.

I övriga import/export-data så verkar det som att alla platinagruppmetaller grupperas ihop under platina eller ännu oftare under ädla metaller. När de klassas ihop med andra ädla metaller, som guld och silver, så är det helt omöjligt att försöka göra någon uppskattning av flödet då både vikten och värdet troligtvis helt domineras av de andra ädelmetallerna.

Då en stor del av återvunna platinagruppmetaller i vår analys har visat sig komma från okända källor så är det uppenbarligen något som inte framkommer ur den statistik som vi har hittat. Det är troligtvis en del elektronik och fordonskatalysatorer som samlas in eller importeras för återvinning utan att det tas

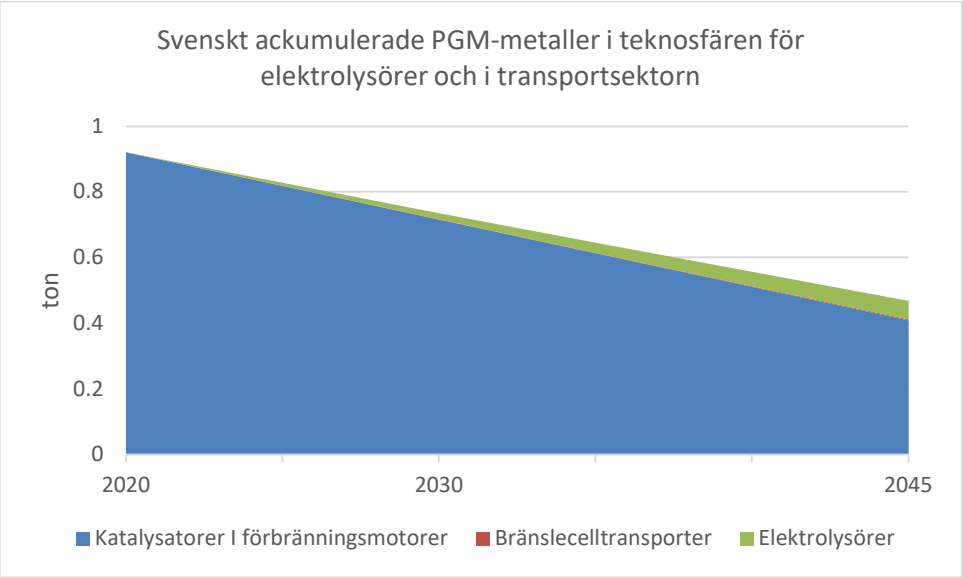
---

till obearbetade block, tackor eller liknande former samt guldsmedssopor innehållande andra ädla metaller).

med i statistiken, eller så döljer det sig under någon kategori som inte uppenbart är skrot eller avfall.

Prognosticerad utveckling

Bränsleceller med vätgas har haft en historiskt varierande utveckling, men under de senaste åren har de tagits på mer allvar än tidigare. Vätgas är koldioxidneutralt vid användning och möjligheten finns att producera koldioxidneutral vätgas om energikällan är koldioxidneutral. Vätgas kan dessutom lagras över lång tid, vilket kan ge stabilitet till ett elnät som till stor del baseras på intermittenta energikällor, förutsatt att produktionen av vätgas anpassas efter tillgången på el. Det behövs katalysatorer i elektrolysörer ör att möta behovet av både vätgasproduktion och bränsleceller. Det finns ett flertal olika typer av elektrolysörer/katalysatorer med olika egenskaper och som använder olika material som katalysatorer. Figur 9 visar prognosen för den ackumulerade mängden platinagruppmetaller (platina, palladium och rodium) i den svenska teknosfären för transportsektorn och elektrolysörer. Den neråtriktade trenden beror på att det antas bli färre bilar med förbränningsmotorer registrerade på vägarna då de till stor del antas ersättas med fordon utan förbränningsmotorer. Antalet bränslecellsfordon och PGM-mängden i bränslecellerna är inte stor nog för att göra någon märkbar skillnad i trenden. Dock så är PGM-behovet i katalysatorerna i elektrolysörer för vätgasframställning något märkbart, men inte stort nog för att ändra den nedåtriktade trenden nämnvärt.



Figur 9. Prognos för den ackumulerade mängden platinagruppmetaller i fordonskatalysatorer för personbilar, vätgas-elektrolysörer, och bränsleceller i personbilar.

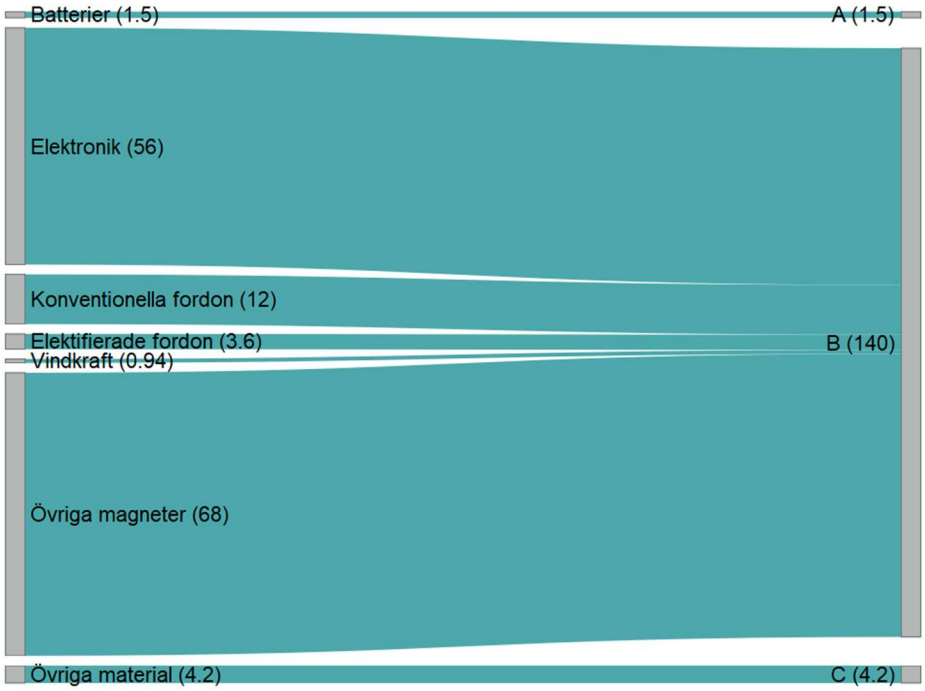
Råmaterialinnehållet i katalysatorer och elektrolysörer för vätgasproduktion och vätgasanvändning togs ur en artikel från Ny Teknik (2021) om de mineral som kommer vara kritiska för vätgasboomen. För att approximera PGM-innehållet för elektrolysörer för vätgasproduktion som kommer behövas i framtiden användes

Sveriges förslag till vätgasstrategi för 2030 och 2045 (Energimyndigheten, 2021a). För att approximera hur mycket katalysatormaterial för vätgasdrivna fordon som kommer behövas för 2030 och 2045 har International Energy Agency globala behov av bränslecelltransporter ändvänts (IEA, 2020) och skalats ner till svensk BNP. För antalet fordon med förbränningsmotorer användes Trafikanalys scenarier för 2020 och 2030 (Trafikanalys, 2020) och en extrapolering gjordes för värdet för 2045.

Kvantitativa skattningar för neodym

Dagens sekundära flöden och återvinning

Neodym och vissa andra sällsynta jordartsmetaller, så som praseodym och dysprosium, spelar en viktig roll i framställningen av permanentmagneter, så kallade NdFeB-magneter. Dessa tre metaller står för ca 84 % av det totala ekonomiska värdet av sällsynta jordartsmetaller och användningen av dessa förutspås öka kraftigt de närmaste åren, framför allt inom sektorerna vindkraft och elektrifierade fordon (European Commission, 2020c). Det finns dock andra tekniker för att framställa magneter, både permanentmagneter och elektromagneter, som kan konkurrera med NdFeB-magneter. Det innebär att mängden neodym i ett vindkraftverk eller i en elbil kan variera kraftigt beroende på modell och tillverkare. I den här studien har neodym använts för att ge en skattning av alla de sällsynta jordartsmetaller som används för framställning av permanentmagneter. Figur 10 visar de flöden av neodym från uttjänta produkter som identifierats i den här studien. Värdena är skattningar av flöden från 2020, eller så nära 2020 som är möjligt. Vindkraftverk och elektrifierade fordon bidrar än så länge endast till en ytterst liten del i de sekundära flödena. Det mesta av avfallet kommer än så länge från elektronik och övriga magneter. Det har inte identifierats några återvinnare av neodym i Sverige. Då neodym återvinns i mycket liten skala från uttjänta produkter, även globalt, så har vi valt att i stället illustrera Figur 10 utifrån produktkategorier. I produktkategori A ingår NiMH-batterier som vi vet att det finns återvinnare för i dagsläget (Umicore, 2021), men det är inte säkert att neodym återvinns från svenska batterier. I produktkategori B ingår alla NdFeB-magneter, ett material som det har forskats en hel del om just för återvinning och vi ser en god potential för att det materialet kommer återvinnas kommersiellt inom en relativt snar framtid. Inom produktkategori C ingår övriga material, vilket bland annat inkluderar glas, keramik och katalysatorer, vilket är material som vi inte ser någon kommersiell återvinning av inom den närmsta tiden.



Figur 10. En skattning av sekundära flöden av neodym från uttjänta produkter i Sverige år 2020. Alla redovisade värden är i form av ton neodym per år. A = material som kan återvinnas i dagsläget, B = material som troligtvis kommer återvinnas inom en snar framtid, C = material som troligtvis inte kommer återvinnas inom en snar framtid.

De två största flödena av sekundär neodym från svenska uttjänta produkter ser ut att komma från *elektronik* och *övriga magneter*. Dessa två flöden är beräknade utifrån global användning av neodym (European Commission, 2020c) med en omräkning till svensk konsumtion utifrån Sveriges del av global BNP. I dessa beräkningar så har det antagits en livslängd på 7 år för elektronik, 15 år för luftkonditionering och 10 år för övrigt. Då de data som gick att utläsa endast sträckte sig tillbaka till 2013 så har det antagits en linjär utveckling de senaste 15 och 10 åren för luftkonditionering och övriga magneter. I diagrammet i Figur 10 så ingår både luftkonditionering (drygt 4 ton neodym) och övrigt (drygt 63 ton neodym) i flödet för övriga magneter (totalt nästan 68 ton neodym). I flödet för elektronik (56 ton neodym) så ingår exempelvis hårddiskar, högtalare och elektriska motorer (utöver från motorer i fordon). Det tredje största flödet för sekundär neodym i Sverige ser ut att vara från *konventionella fordon*, vilket då framför allt sitter i elektrisk servostyrning. Det flödet har beräknats utifrån antalet skrotade personbilar (Trafikanalys, 2021) där det antogs att varje personbil innehåller i snitt 75 gram neodym utifrån beräkningar av Yang, et al. (2017).

Flödet av neodym från uttjänta *batterier* utgick ifrån samma beräkningar av NiMH-batterier som i beräkningen av koboltflödet, det vill säga antalet fordon är det samma och batteristorleken är det samma. Det inkluderades även data för

insamlade batterier via batteriinsamlingen (SCB, 2020e). För att beräkna metallmaterial per NiMH-batteri användes data från Larsson et al. (2013).

Flödet av neodym från elmotorer ifrån uttjänta *elektrifierade fordon* utgick också ifrån samma beräkning av antalet BEV, HEV, PHEV, bussar och elcyklar som i beräkningen av koboltflödet, det vill säga antalet fordon är det samma. Elcyklar antas innehålla 100 gram neodym per cykel i snitt. BEV, HEV, PHEV och bussar beräknas innehålla ungefär 375 gram neodym per fordon i snitt, beräknat utifrån data från Yang, et al. (2017).

För att approximera mängden sekundär neodym från uttjänta *vindkraftverk* så antogs livslängden för alla svenska vindkraftverk vara 25 år och därmed togs statistik för nyinstallerad vindkraft från 1995 som representativt för uttjänta vindkraftverk i dagsläget (Energimyndigheten, 2021c). Det antogs också att varje landbaserat vindkraftverk innehåller i snitt 32 kg neodym per megawatt och varje havsbaserat vindkraftverk innehåller i snitt 204 kg neodym per megawatt (European Commission, 2020f). Det antogs dock att alla vindkraftverk från 1995 var landbaserade.

Mängden *övriga material* utgår ifrån Ciacci et al (2019) som redovisar att EU-28 använder ca 150 ton neodym till keramik, katalysatorer och annat övrigt material, vilket räknats om till svensk nivå utifrån BNP. Det antogs att avfallsmängden motsvaras av 80 % av konsumtionen.

Rimlighetsbedömning av uppskattade mängder

De största flödena av sekundär neodym är baserade på global konsumtion och endast omvandlade till en storleksuppskattning utifrån den svenska andelen av global BNP. Det är alltså mycket grova uppskattningar och har inte kontrollerats utifrån svenska data för import, export, produktion eller avfallshantering. Det är å andra sidan rimligt att anta att svensk konsumtion av exempelvis elektronik och övriga magneter borde någorlunda följa samma mönster som den globala konsumtionen. Däremot så är det värt att ifrågasätta om svensk konsumtion av luftkonditionering följer samma mönster som global konsumtion då det troligtvis är väderberoende, men eftersom det gav ett relativt litet bidrag till helheten så valde vi att ha det kvar i den skattningen.

Om vi jämför de totala flödet av sekundär neodym från Sverige, vilket alltså till stor del är beräknat utifrån global konsumtion, med de data som presenteras för EU-konsumtion i European Commission (2020c) så ser vi en kraftig avvikelse. Där ser det ut som att den totala EU-konsumtionen av REE-magneter är ungefär lika stor som det sekundära flödet av neodym från Sverige. Det är inte rimligt och vår tolkning av det är att konsumtionsdata i den rapporten syftar på vad som konsumeras inom industrin, inte vad som finns i slutprodukten och så småningom hamnar i det sekundära flödet av uttjänta produkter som har potential att återvinnas. Det går till exempel att utläsa att Kinas konsumtion av sällsynta jordartsmetaller har ökat från att vara ca 25 % av den globala konsumtionen år 2000 till att vara ca 70 % av globala konsumtionen år 2019, vilket tyder på att det

snarare handlar om industriell konsumtion än användning i slutprodukterna. En jämförelse med till exempel Ciacci et al. (2019) som har kartlagt produkter i stället för produktion inom EU visar siffror som är mer i linje med den här kartläggningen. Där har det å andra sidan redovisats något annorlunda siffror än vad vi har använt för hur mycket neodym som finns i olika produkter, vilket förtydligar just hur osäkert det kan vara.

När det kommer till de områden som förväntas öka snabbt den närmaste tiden, nämligen vindkraften och elektrifierade fordon, så ser vi att det är fullt rimligt att anta att de endast ger ett litet bidrag än så länge då de i stor utsträckning fortfarande används och inte har hunnit bli avfall ännu. Det är däremot en svårighet att få fram ett exakt värde på dessa sektorer, framför allt på grund av att mängden neodym per produkt kan variera enormt beroende på modell och tillverkare. Om ett enda någorlunda nytt vindkraftverk råkar skrotas i förtid så kan det innebära att mängden sekundär neodym från vindkraften fördubblas jämfört med vår kartläggning, det vill säga att det läggs till ett extra ton neodym. Om svenskar föredrar en specifik tillverkare av elbilar så kan det också förändra resultatet kraftigt, beroende på vilken typ av elmotor som den tillverkaren använder i sina elbilar. De data som har tagits fram i den här studien för vindkraft och elektrifierade fordon har inte inkluderat i vilken utsträckning olika modeller av fordon och vindkraftverk som används i Sverige. Modellen bygger dessutom på historiska inköp och en grov uppskattning av livslängd, inte hur mycket som egentligen skrotas.

För konventionella fordon samt för elektrifierade fordon så kan vi till exempel jämföra med de två Volvomodeller som redovisats i en rapport från Chalmers Energiavdelning (Ljunggren & Ingemarsdotter, 2014). I deras fall så har en specifik konventionell personbilsmodell 43 gram neodym per fordon, men i vårt fall så räknade vi med 75 gram i snitt för alla. Deras specifika hybridmodell har 530 gram neodym, men i vårt fall räknade vi med 450 gram (375 gram i elmotorn och 75 gram i övrigt) i snitt för alla. Om vi i stället hade utgått från deras siffror så hade det resulterat i 5 ton mindre neodym från konventionella fordon och 0,3 ton mer neodym från elektrifierade fordon. Det är dock siffror som baseras på endast en modell av varje typ av fordon och får i det här fallet mer räknas som att det bekräftar att det troligtvis är i rätt storleksordning men kan variera från fordon till fordon.

Identifierade dataluckor

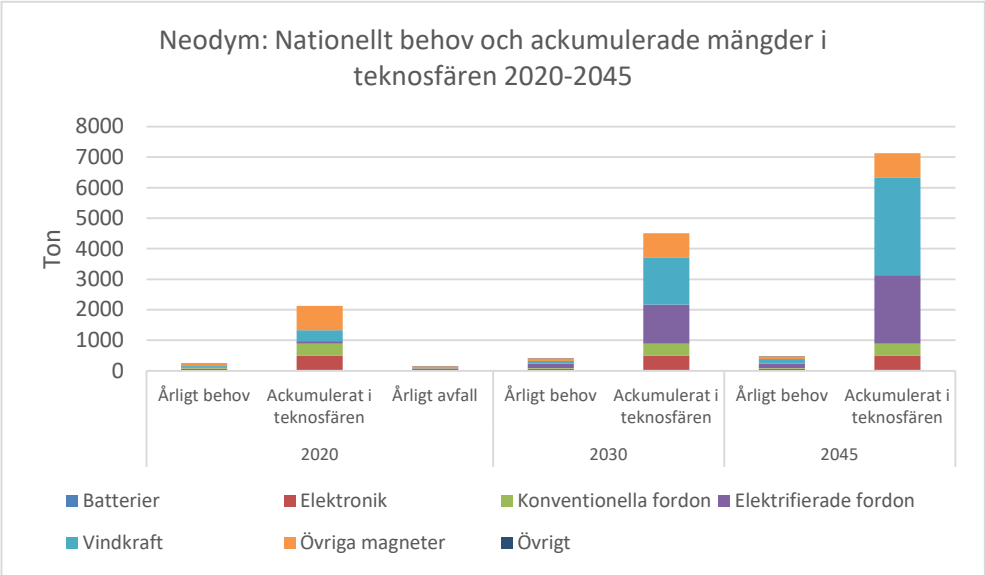
Precis som i flödesberäkningarna av övriga kartlagda råmaterial så är det svårt att få fram uppgifter på hur hög halten av neodym är i olika produkter. I fallet med neodym så blev det till och med ännu tydligare då magneter kan göras på ett flertal olika sätt och att inte alla innehåller neodym.

Det gick i den här studien inte att få fram data för vilka modeller av vindkraftverk eller elektrifierade fordon som producerats. Det visade sig också vara svårt att få fram data för hur många vindkraftverk och elektrifierade fordon som skrotas varje år, endast hur många som installeras/registreras.

Det lades inte någon större vikt vid att försöka få fram motsvarande data för elektronik eller övriga magneter, men det är troligtvis liknande problem där.

Prognosticerad utveckling

Figur 11 visar trender för neodym i behov för 2030 och 2045 enligt två av Energimyndighetens scenarier (Energimyndigheten, 2021b) för vindkraften och med den förväntade ökningen i neodym i elektrifierad transport (Power Circle, 2018; Power Circle, 2019). Antaget är att behov av neodym för andra tillämningar hålls konstant. Det är också antaget att enbart neodymmagneter används och inte andra substitut. Detta antagande bygger på att neodymmagneter är de permanentmagneter ger starkast magnetfält i dagsläget, vilket generellt leder till mer effektiva generatorer och elmotorer.



Figur 11. Figuren visar för 2020, 2030, och 2045, det årliga behovet av neodym uppdelat i olika produktkategorier. Detsamma har gjorts för det ackumulerade neodymet i teknosfären. En stapel har också skapats för att visa på avfallet från produktkategorier med neodym för 2020. Staplar för 2023 och 2045 bygger på Energimyndighetens *Scenarie Elektrifiering* för 2030 och 2045 (Energimyndigheten, 2021b).

Figur 11 visar att trenden för ackumulerat neodym kommer stiga snabbt i Sverige om vindkraften ska byggas ut och transportsektorn ska elektrifieras. Livslängden för elfordon har i referensen (Power Circle, 2018) antagits vara 17 år medan livslängden för vindkraftverk kan vara något högre, uppåt 25 år eller mer. Då den stora ökningen av elmotorer i elbilar och utbyggnad av vindkraftverk redan har börjat så är det rimligt att säga att en märkbar skillnad på avfallet från dessa produktkategorier kommer ske efter 2030 och därefter fortsätta. Magneter i vindkraftsgeneratorer är i dagsläget stora och har därför större möjlighet att återvinnas effektivt då det i praktiken bör bli mindre förluster i stegen före materialet kommer fram till återvinningscentralen. Magneter i elbilar är betydligt

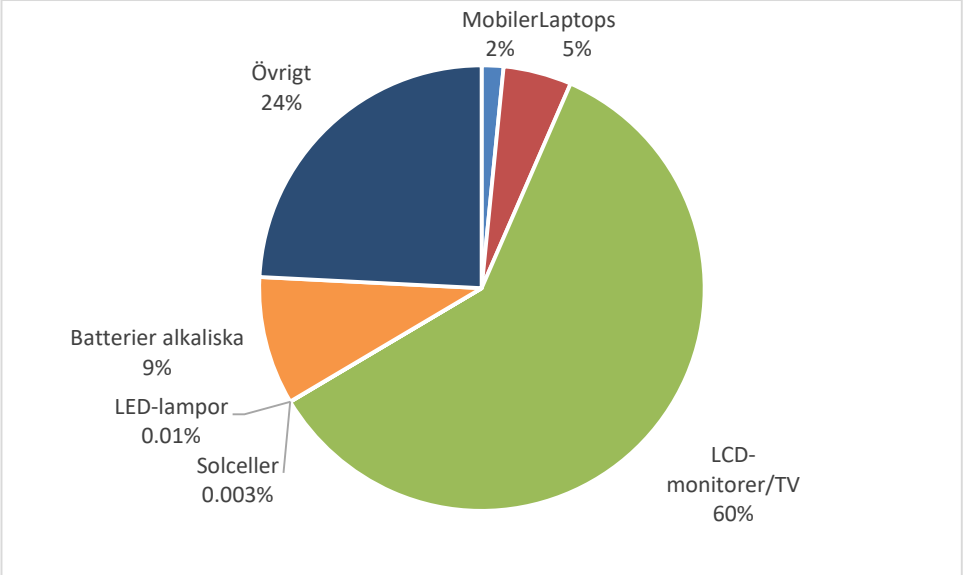
mindre och fler i antal, vilket kräver mer arbete för att separera från elmotorerna och göra färdigt för återvinning. Magneter från småelektronik, såsom hörlurar och mobiltelefoner, är mycket små och är också mycket svåra att separera ut i ett rent flöde till en rimlig kostnad. De kan möjligtvis separeras ut i ett blandat flöde ihop med ferromagnetiskt skrot där magneterna senare kan avmagnetiseras genom värme och på så vis separeras från övrigt skrot.

I behovet för 2045 ingår även neodym som behövs för att bygga ut nya vindkraftverk för att ersätta gamla (antagen 25 års livstid). Elbilarnas livslängd antas vara 17 år, vilket även inkluderar nyregistreringar för att ersätta de som skrotas.

Kvantitativa skattningar för indium

Dagens sekundära flöden och återvinning

Indium används i dagsläget framför allt i form av indium-tenn-oxid (ITO) som är ett transparent och elektriskt ledande material. Det används bland annat på plattskärmar (TV, datorskärmar, mobiler och så vidare) men även på solceller. Då solceller förväntas öka kraftigt i användning så har indium inkluderats i denna studie för att undersöka huruvida detta sekundära flöde kan spela någon väsentlig roll för en svensk energiomställning. Figur 12 visar de flöden av indium från uttjänta produkter som identifierats i den här studien. Värdena är skattningar av flöden från 2020, eller så nära 2020 som är möjligt. Solceller bidrar än så länge endast till en mycket liten del i de sekundära flödena. Det mesta av avfallet kommer, än så länge, från olika former av plattskärmar. Det har inte identifierats några faktiska återvinnare av indium i Sverige, även om det har identifierats två aktörer som har tekniken eller ambitionen att återvinna indium åtminstone från industriellt spill. Då indium återvinns i mycket liten skala från uttjänta produkter, även globalt, så har vi valt att i stället illustrera Figur 12 utifrån vad som har identifierats som avfall. Den totala mängden indium i uttjänta produkter har beräknats vara ca 1 900 kg år 2020.



Figur 12. En skattning av sekundära flöden av indium från uttjänta produkter i Sverige år 2020. Den totala mängden har beräknats till ca 1 900 kg indium.

Flödena av *mobiler*, *bärbara datorer*, *LCD-monitorer/TV*, *solceller* och *LED-lampor* har beräknats utifrån svensk konsumtion av samma produkter och antagna koncentrationer av indium i produkterna. För konsumtionen användes import- och exportdata samt produktionsdata (baserat på KN-koder). För mobiler antogs en livslängd på 2 år, vilket innebär att avfallet baseras på nettoimport och produktion för år 2018. För bärbara datorer antogs en livslängd på fem år och för LCD-monitorer/TV antogs en livslängd på sex år, med tillhörande data från 2015 och 2014. I fallen med LED-lampor och solceller så gick det inte att utläsa några rimliga mängder tillräckligt långt tillbaka i tiden. För LED-lampor antogs i stället att mängden avfall motsvaras av 5 % av konsumtionen 2020. För solceller antog vi 30 års livslängd och utgick från data som tyder på att det installerades ca 100 kW solceller år 1990 (Energimyndigheten, 2016). För solceller har det endast inkluderats uppskattad mängd indium i form av ett tunt skikt av ITO på solceller generellt, inte själva solcellsmaterialet från tunnfilmssolceller exempelvis i form av CIGS. Halten indium i materialen uppskattades till 47 g/ton för mobiler, 32 g/ton för bärbara datorer, 111 g/ton för LCD-monitorer/TV, 0,67 g/ton för LED-lampor och 3,8 g/ton för solceller. Dessa data baseras till stor del på data från Yang (2015), Virolainen et al. (2011), Zhou et al. (2019) och Chen et al. (2020) samt egna uppskattningar om ungefärlig storlek och vikt på produkterna.

Flödet av indium från *alkaliska batterier* har beräknats utifrån såld mängd batterier (SCB, 2020e) med en antagen livslängd på två år. Halten indium i materialet har antagits vara 47 gram indium per ton batterier, baserat på data från Indium Corporation (2008) som vi har tolkat som att förhållandet indium/zink i batterierna troligtvis är lägre än 0,5 % i snitt vilket därför antogs vara 0,2 %.

Flödet av indium från *övrigt* har uppskattats utifrån EU-konsumtion (European Commission, 2020c), med en omräkning baserat på BNP. Det har antagits att

avfallsflödet motsvaras av 80 % av konsumtionen samma år. Detta flöde inkluderar halvledare (utöver LED-lampor), lödmetall, legeringar och termiskt interfacematerial.

Rimlighetsbedömning av uppskattade mängder

Det är svårt att bedöma hur pass rimliga dessa mängder är. Flera av mängderna är delvis baserade på egna skattningar om storlek och koncentration. Om det totala flödet på 1 900 kg indium jämförs med EU-konsumtion (European Commission, 2020c) så ser vi att utifrån en omräkning baserad på BNP så borde svensk konsumtion ligga på omkring 2 300 kg indium, vilket är rimligt med tanke på att konsumtionen troligtvis är något högre än avfallsmängden. Om det i stället jämförs med den globala framställningen på 827 ton indium per år (European Commission, 2020c) så skulle den svenska konsumtionen (baserat på BNP) ligga på strax över 5 000 kg, vilket är betydligt högre och tyder på att det eventuellt saknas något som inte återfinns i statistiken. En trolig källa skulle kunna vara kategorin övrigt som baseras på EU-konsumtion. Om detta baseras på industriell användning inom EU, så som vi misstänker i neodym-fallet, så döljer det sig här en del produkter som importeras från andra delar av världen. Det flödet inkluderar bland annat en del material som används flitigt inom elektronik (halvledare, lödmetall, termiskt interfacematerial) vilket mycket väl kan importeras från till exempel Asien.

Från data för import/export/produktion så gick det att utläsa att konsumtionen av mobiler, bärbara datorer och LCD-monitorer/TV har minskat sedan omkring 2014. Det är inte helt orimligt men det innebär att enligt våra antaganden om livslängd så blir konsumtionen av indium från dessa produkter faktiskt lägre än avfallsflödet, vilket kanske är mindre troligt. Det är ett tecken på att livslängden borde undersökas närmare och troligtvis modelleras utifrån sannolikhetsfördelning att en produkt blir avfall efter ett visst antal år i stället för en exakt livslängd där alla produkter av en viss kategori blir exakt lika gamla.

Identifierade dataluckor

I fallen med LED-lampor och solceller så var data för import/export/produktion osäkra. Ibland var summan av import och produktion lägre än exporten, vilket är orimligt. Om en vara ska exporteras så måste den antingen importeras eller produceras först. Något år gick det att se att det i Sverige skulle ha producerats mer än 700 000 ton solceller och övriga år hade det i snitt producerats 57 ton per år vilket visar på att det saknas statistik eller information som kan kompensera för denna skillnad.

Prognosticerad utveckling

Behovet av indium för solceller är inte särskilt stort för tillfället men behovet ökar exponentiellt. Utifrån de antaganden och beräkningar som gjorts i den här studien så verkar det som att installationen av solceller år 2020 motsvarade ungefär 80 kg indium, vilket behöver öka tiofalt innan det blir ungefär lika stort som behovet av indium till LCD-monitorer/TV. Då har det inte räknats med något indium från CIGS, men det är än så länge en liten andel av den globala marknaden för solceller

som i dagsläget domineras av kiselbaserade solceller. Från Energimyndighetens kortsiktsprognos (Energimyndigheten, 2021d) går det att utläsa att solkraften i Sverige förutspås öka från 0,7 TWh under 2019 till 3 TWh under 2022, vilket motsvaras av en fördubbling på lite mer än två år. Om den ökningen stämmer och ökningen fortsätter i samma takt så krävs det mindre än åtta år innan användningen har tiofaldigats. En sådan ökning skulle också innebära att det produceras ca 10 TWh el från solceller år 2028, vilket är samma mängd som Energimyndigheten förutspår för år 2050 i sin långtidsprognos (Energimyndigheten, 2021b). Oavsett om det sker 2028 eller 2050 så lär det dröja ytterligare ett flertal år innan det dyker upp i dessa mängder i de sekundära flödena på grund av solcellernas långa livslängd.

På återvinningsmarknaden ser vi inte att uttjänta produkter är på väg att spela någon större roll de närmaste åren, i alla fall inte i Sverige. Däremot så kan produktionsspill komma att spela en viktig roll. Det finns åtminstone två aktörer i Sverige som har teknik för att återvinna indium, Midsummer och Mat4Green Tech (se beskrivning under avsnittet om Identifierade nyckelaktörer), där i alla fall en har uttalat att de har planer på att sätta i gång en återvinning (Göteborg Energi, 2021). De halter av indium i uttjänta produkter som listats i denna studie är ungefär i samma storleksordning som i malm (1–100 g/ton) där det utvinns som en biprodukt till andra ämnen så som zink (European Commission, 2020c). Med tanke på att indium ligger relativt långt till höger i Figur 4 (som illustrerar ungefärligt värde av svensk slutkonsumtion av de studerade råvarorna) så framstår det som osannolikt att indium kommer att bli attraktivt för kommersiell återvinning från uttjänta produkter inom en nära framtid.

Utformning av spårbarhetssystem för ökad cirkularitet

En effektiv funktionell tillämpning av avfallshierarkin förväntas bli allt viktigare för att minska beroendet av kritiska råmaterial. Idag sker en snabb utveckling av bland annat elfordonsbatterier, där en lämplig design ökar möjligheterna att förlänga livslängden genom smart underhåll och reparation. Battericellerna kan därefter återanvändas i till exempel ett stationärt energilager innan det slutligen behöver återvinnas. För att detta ska vara möjligt för så komplexa produkter som elfordonsbatterier, solcellspaneler, vindkraftsturbiner, liksom hemelektronik och fordon, är det nödvändigt att aktörerna i varje steg av produktens livscykel har tillräckligt detaljerad och tillförlitlig information om produkten. En cirkulär ekonomi, inte minst för kritiska råmaterial, kräver därför spårbarhetssystem.

Spårbarhetssystem har använts i olika värde-/försörjningskedjor[5] under relativt lång tid, främst som en metod att säkerställa att kvalitetsmärkningar av slutprodukter

[5] Från engelskans *value chains* och *supply chains*.

håller vad de lovar, hantera risker och felkällor i processen och för att förhindra förfalskningar (UN Global Compact, 2014; Swedish Lifecycle Centre, 2021; Hemmelberg & Hanna, 2021). De används huvudsakligen inom linjära värdekedjor. Samtidigt framhålls spårbarhet allt oftare som en av nycklarna för en ökad återvinning (Committee on Sustainability Assessment, 2019; Stena Recycling Group, 2021; Swedish Lifecycle Centre, 2021, Hemmelberg & Hanna, 2021). Trots det saknas fortfarande system för att säkra återvinning – och därmed kunna öka utnyttjandet – av kritiska råmaterial. Dessa värdefulla material, går därför förlorade genom materialläckage[6] och downcycling (Stena Recycling Group, 2021).

Spårbarhet för att bidra till cirkulär ekonomi förväntas växa fram som en reaktion på bland annat pågående lagstiftning på EU-nivå. Det finns därför goda skäl att belysa lämpliga kriterier för utformning av sådana system tillsammans med de hinder som behöver undanröjas.

Begreppet spårbarhet (*traceability*) används för att beskriva många olika system, med mer eller mindre olika syften. Det här återspeglas i UN Global Compacts (2014) definition av spårbarhet:

> *Traceability: The ability to identify and trace the history, distribution, location and application of products, parts and materials, to ensure the reliability of sustainability claims, in the areas of human rights, labour (including health and safety), the environment and anti-corruption.*

Bredden i definitionen och de sinsemellan ganska olika spårbarhetssystem som finns eller är under utveckling idag kan förklara den begreppsförvirring som råder mellan olika aktörer (Svemin, 2019). Den kan i sig utgöra ett hinder för utveckling, implementering och acceptans av spårbarhet.

Det som utmärker spårbarhetssystem som syftar till att främja återanvändning och återvinning är att informationen som följer med produkten fortfarande måste vara giltig efter att produkten har passerat hela användarfasen. Det är en stor utmaning jämfört med de linjära system som till exempel ska säkerställa en råvaras ursprung (konfliktmineral eller ekologiskt producerade livsmedel). I de fallen rör sig både varan och informationen i kända, om än i många fall komplexa, värdekedjor. Ett konkret exempel på ett spårbarhetssystem för återvinning är retursystemet av flaskor och burkar. Det är enkla produkter vars egenskaper är tillräckligt väl kända när de lämnar produktionen och som kan antas vara oförändrade vid retur, som kan

[6] Material går förlorat ur kretsloppet, till exempel genom att produkter hamnar på deponi. Det kan bero på både att produkten inte alls samlas in för återvinning och att den inte kan återvinnas, antingen på grund av att designen omöjliggör det eller för att det saknas information om hur produkten ska återvinnas. Det gäller bland annat batterier, där en stor del av Europas batterier försvinner ut ur EU i slutet av livscykeln (ECOS, 2021)

märkas i sin helhet, som uppehåller sig under en kort period i användarfasen och som inte utsätts för modifikationer under sin livscykel. Vid en jämförelse skiljer sig till exempel ett fordon på samtliga punkter.

Förädlade råmaterial, som specialstål och andra legeringar, förlorar sina särskilda egenskaper när de smälts ner vid återvinningen. Därför vore det sannolikt önskvärt att kunna behålla identiteten på sådana råmaterial genom hela dess cykel så att det kan återanvändas. Detsamma gäller om man vill behålla kunskapen om den specifika råmaterialenhetens ekologiska fotavtryck genom hela cykeln. Idag går även legeringsmetallerna i hög grad förlorade vid återvinning. Förutsättningarna för återvinning skiljer med andra ord mellan olika råmaterial. En hög återvinning av till exempel järn/stål kan ske på bekostnad av återvinningen av kritiska legeringsmetaller. Fram tills idag används praktiskt taget all nickel i legeringar (European Commission, 2020d). Vi vet att behovet av nickel i batterier nu ökar mycket kraftigt. Även om EU inte klassificerar nickel som kritisk kan det hypotetiskt bli värdefullare att återvinna nickel ur legerat stål än att återvinna järn. Oavsett sannolikheten i en sådan utveckling kan det fungera som en illustration av vikten att noga utvärdera syftet – och följdeffekter – av framtida spårbarhetssystem. I följande avsnitt utvecklar vi därför förutsättningarna för att utforma spårbarhetssystem för ökad cirkularitet av kritiska råmaterial. Även om det kan finnas vissa skillnader i vilken information som behöver spåras för återanvändning jämfört med återvinning, så menar vi att analysen i den här studien är tillämplig på båda.

Förutsättningar och framgångsfaktorer

Samarbete mellan värde-/försörjningskedjans olika aktörer är helt avgörande för varje fungerande spårbarhetssystem (UN Global Compact, 2014; IVL, 2021; Hemmelberg & Hanna, 2021). Det förutsätter acceptans i bred mening och tillräcklig tillit både mellan aktörerna och hos varje aktör för systemets design. Det här är i många fall en stor utmaning eftersom råmaterial och produkter flödar i komplexa, ofta globala nätverk (UN Global Compact, 2014; Hemmelberg & Hanna, 2021). Det gäller inte minst metaller, som handlas internationellt (Svemin, 2019) där antalet aktörer är potentiellt mycket stort. Två komplementära ansatser för att hantera den här komplexiteten och skalan är att fokusera på de viktigaste flödena och att försöka skapa slutna system. Det sker idag bland annat för elfordonsbatterier. EU arbetar för närvarande med att ta fram ett specifikt regelverk för att säkra återvinning av fordonsbatterier. Denna batteriförordning ska ersätta batteridirektivet 2006/66/EG och ändra nuvarande förordning (EU) 2019/1020 (Sveriges riksdag, 2021). Eftersom elfordonsbatterier förväntas stå för en så stor del av den totala efterfrågan av flera kritiska råmaterial de närmaste decennierna kommer batteriförordningen att få en stor betydelse också för utvecklingen av spårbarhetssystem. Redan idag har flera parallella initiativ tagits av bland annat fordonsindustrin och World Economic Forum. I korthet innebär batteriförordningen bland annat att det från 2024 kommer att ställas krav både på batteriernas klimatavtryck och andel sekundära råmaterial (European Commission,

2020e). Digitala batteripass ska säkerställa att den här informationen blir spårbar under hela livscykeln och inte minst underlätta uppfyllandet av krav på insamling och återvinning. Batteriförordningen kombinerar produkt- och avfallsperspektiven, vilket är en förutsättning för en cirkulär ekonomi (Stena Recycling Group, 2021). Hur data ska samlas in, vilka roller olika aktörer kommer att få och vilka tekniker eller standarder som ska användas är fortfarande oklart (Circulor, 2021).

För att etablera ett fungerande samarbete krävs att aktörerna har en vilja att delta. Förenklat kan drivkraften vara extern (det vill säga att uppfylla lagkrav), intern (att nå en större cirkulär lönsamhet eller andra mål som aktören själv har satt upp) eller en kombination. Generellt gäller att införandet av fungerande spårbarhetssystem underlättas om det bidrar till lönsamhet och kan ge aktörer som ansluter sig någon form av konkurrensfördel (Svemin, 2019). Likaså underlättas det av att det finns befintliga samarbeten inom andra frågor längs värde-/försörjningskedjor, till exempel inom fordonsklustret i norra Europa (Stena Recycling Group, 2021) Införande av fungerande spårbarhetssystem är ett resurskrävande åtagande. Återvunna råmaterial konkurrerar med primära råmaterial och även om det ur samhällets perspektiv är önskvärt att maximera nyttjandet av sekundära material måste de vara konkurrenskraftiga (Stena Recycling Group, 2021; Hemmelberg & Hanna, 2021). Det innebär också att kretsen av aktörer som ska ansluta sig till systemet måste överensstämma tillräckligt väl med marknaden på vilken materialet handlas (Svemin, 2019; Hemmelberg & Hanna, 2021). I de fall kretsen kan avgränsas till Sverige/EU kan offentliga upphandlingar ha en viktig roll för att åtminstone under en övergångsfas mot etablering av starka cirkulära flöden premiera sekundära material. Detta utvecklas ytterligare i avsnittet om Aktörer och drivkrafter nedan.

Utöver viljan att samarbete och dela information i värde-/försörjningskedjan är det nödvändigt att produkten är designad och tillverkad på ett sådant vis att den kan återvinnas på ett rationellt vis (Stena Recycling Group, 2021). Det här är ett exempel på att fungerande spårbarhetssystem är långsiktiga åtaganden. Parallellt med den information som flödar i det formella systemet är erfarenhetsutbytet mellan aktörerna viktigt. I de fall det finns en dialog mellan aktörerna kan återvinnare enklare återkoppla till producenter hur de bör ändra sin produktdesign för att kunna få tillbaka en större andel högvärdigt råmaterial. Cirkulär design är enklare att tillämpa i nya, framväxande värde-/försörjningskedjor än i befintliga. Det gäller inte bara designen av produkter utan också av affärsmodellen (IVL, 2021). Drivkraften att bidra till spårbarhet för ökad cirkularitet bör öka i takt med att affärsmodellen drar nytta av eller rentav förutsätter den. Samtidigt är drivkraften att skifta till cirkulära affärsmodeller beroende av hur tillgängliga fungerande spårbarhetssystem är. Kopplingen mellan spårbarhet och affärsmodell är därför både en möjlighet och ett hinder (Carlsson, 2021; Hemmelberg & Hanna, 2021, Stena Recycling Group, 2021).

Med ovanstående förutsättningar uppfyllda krävs också en ändamålsenlig design av spårbarhetssystemet. Designen omfattar både det administrativa systemet, med regler om hur bland annat beräkningar, rapportering och verifiering ska gå till, och

det tekniska systemet för hantering av data. Systemdesignen kopplar direkt tillbaka till frågan om tillit och därmed den inledande, avgörande, förutsättningen för att etablera ett fungerande spårbarhetssystem. Om inte aktörerna känner tillit till systemet kommer de att vara obenägna att ansluta sig till det. Systemets komplexitet och omfattning styrs av dess syfte men rymmer i samtliga fall en lång rad detaljer att ta ställning till som kräver en bred expertis. Centrala frågeställningar är val av chain of custody-modell, standardisering, spårning av råmaterial eller produkt samt koppling mellan fysisk produkt/material och information. Detta utvecklas ytterligare i avsnittet om Systemdesign nedan. Å ena sidan kan det finnas fördelar med att försöka utöka ett befintligt spårbarhetssystem med funktionaliteten som krävs för ökad cirkularitet, i form av existerande informationsutbyte och tillit mellan värde-/produktionskedjans aktörer och ett fungerande system att utgå ifrån. Etableringsfasen kan därmed bli kortare. Å andra sidan finns det få, om några, etablerade system för de kritiska råmaterial som ingår i den här studien att expandera. Det kommer sannolikt att ändras med tiden. Som antytts ovan kan det också finnas betydande vinster med att skräddarsy systemet med väl definierade avgränsningar. Den avvägningen måste därför göras från fall till fall, när det blir aktuellt.

Aktörer och drivkrafter

Eftersom värde-/försörjningskedjorna skiljer sig åt för olika kritiska råmaterial går det bara att ge exempel på specifika aktörer. Kompletta aktörsanalyser är alltför omfattande för den här studien. Vi har valt att dela in aktörerna i tre generella kategorier:

1. Användare (primära): De företag som ingår i råmaterials värde-/försörjningskedja och som därmed förväntas delta som aktiv användare i spårbarhetssystemet.
2. Kravställare (sekundära): Både myndigheter och kunder som kan ställa både hårda och mjuka krav på företagen att antingen etablera spårbarhetssystem och/eller kunna redovisa information om produkterna som i sin tur förutsätter spårbarhetssystem. Observera att aktörer kan vara både primära och sekundära. Den dynamiken, att ett företag i ena rollen ställer krav på sina leverantörer, och i en annan roll använder informationen för till exempel redovisning eller marknadsföring är en nyckel för att driva utvecklingen av spårbarhetssystem (Hemmelberg & Hanna, 2021). Det kan förväntas bli en starkare drivkraft i cirkulära flöden än linjära.
3. Stödjande (tertiära): Aktörer som på olika vis kan underlätta etableringen och acceptans av nya system. Det kan vara miljöorganisationer, teknikleverantörer, certifierings- och revisionsorganisationer med flera.

Bland **användarna** är återvinnarna en självklar nyckelaktör, tillsammans med det ekosystem av återanvändare som finns och växer fram runt dem. Ett exempel är företaget BatteryLoop, som tillverkar batterilager av återanvända celler från

elfordonsbatterier. Företaget är del av Stena Metall och har sitt ursprung i Stena Recycling (BatteryLoop, 2021). Northvolt är ett intressant exempel på en aktör som bygger upp en helt ny värde-/försörjningskedja och i kraft av sin storlek kan ställa krav. De har redan gått ut med målsättningen att skala upp tillverkningen av batterier med 100 % återvunnen nickel, mangan och kobolt (Northvolt, 2021a), samtidigt som de deltar i projekt för att tillvarata de restmaterial de inte själva avser att återanvända (Northvolt, 2021b). Båda exemplen kräver god kunskap om materialsammansättningen, vilket förutsätter eller uppmuntrar någon form av spårbarhetssystem. Både Northvolt, BatteryLoop och HYBRIT, för att även ta ett exempel som inte fokuserar på kritiska råmaterial, framhåller sina industriella partnerskap. Det pekar på värdet av att sluta och förenkla värde-/försörjningskedjorna och på så vis underlätta och undanröja hinder för informationsdelning (utöver andra fördelar som samarbetena kan ge). Se även avsnittet Identifierade nyckelaktörer ovan för fler exempel på primära aktörer.

I Figur 13 sammanfattas de viktigaste drivkrafterna för de primära aktörerna enligt en rapport från UN Global Compact (2014) Sammanfattningsvis kan spårbarhet enligt samma rapport sägas ge en *license to operate* för de deltagande företagen. Det här påminner om att spårbarhetssystemet – och därmed drivkraften för att införa det – syftar till något annat och att spårbarhetssystemet är ett verktyg att uppnå detta (Karim, 2021; Bergholt, 2021).

Values and Efficiencies	Stakeholder Pressure	Regulation	Global Alignment
1. Reducing risk 2. Operational efficiencies and process consistency 3. Securing supply 4. Supplier selection and supplier relationships 5. Reputational benefits	6. Meeting stakeholder demands for more product information 7. Ensuring sustainability claims are true	8. Meeting legal requirements	9. Standardization of expectations, processes and systems 10. Ensuring security of natural resources

Figur 13. Sammanställning av de viktigaste drivkrafterna för att använda spårbarhetssystem, enligt UN Global Compact (2014).

De viktigaste **kravställarna** är lagstiftare och myndigheter, privatkonsumenter och professionella konsumenter. Lagstiftning är det starkaste verktyget för att tvinga fram en förändring (IVL, 2021). Ett av få tydliga exempel inom spårbarhetssystem är Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act från 2010, som innebär att börsnoterade företag i USA måste redovisa om deras inköp av så kallade 3TG-metaller[7] finansierat väpnade konflikter (Tillväxtanalys, 2019). I mars år 2017 beslutade EU att införa en liknande lag som i USA. Mycket tyder på att lagstiftningen kommer att få en viktigare roll framöver. EU-kommissionens förslag om en ny batteriförordning har bland annat en del som handlar om spårbarhet,

[7] Förkortningen syftar på tenn, volfram (eng. *tungsten*), tantal och guld.

vilket nämns i avsnittet om Förutsättningar och framgångsfaktorer ovan. Spårbarheten kopplas även till arbetet inom EU med att ta fram produktpass. Ett av de sex miljömålen i EU:s nya taxonomiförordning är övergång till cirkulär ekonomi (Regeringskansliet, 2021). Syftet är att styra finansiella aktörer mot hållbara investeringar för att på sikt uppnå EU:s klimatmål och förordningen ökar kraven på hållbarhetsrapporteringen från större företag, vilket ytterligare kan bidra till etablering av spårbarhetssystem.

Konsumentkrav kan ha mycket stor betydelse för tillverkarna och hållbarhet har under många år blivit allt viktigare inom bland annat mode och livsmedel (IVL, 2021; Hemmelberg & Hanna, 2021). Samtidigt är det svårt för enskilda konsumenter att både få tillgång till relevant hållbarhetsinformation och fullt ut fatta rationella beslut på basis av den informationen. Enligt Tillväxtanalys (2019) är metallers hållbarhet mycket sällan den viktigaste faktorn vid val av bilar och mobiltelefoner. Dessutom finns en diskrepans mellan hur slutkonsumenter rankar hållbarhetsaspekter och vilka val de gör. Detta är särskilt tydligt för mobiltelefoner där konsumenter rankar mänskliga rättigheter högt men inte väljer detta i en konkret valsituation (Tillväxtanalys, 2019). Till skillnad mot privata konsumenter besitter professionella konsumenter generellt en större kompetens om hållbarhetsrisker och kan vara mer drivande i kravställningen av produkter (Tillväxtanalys, 2019). Det pekar på att den offentliga sektorn, genom upphandling, kan skynda på omställningen mot ökad spårbarhet och cirkularitet (Tillväxtanalys, 2019; Svemin, 2019). Finansiärer kan sägas utgöra en specialkategori av professionella konsumenter. Idag pågår ett intensivt arbete inom finansmarknaden med att öka kunskapen om hållbarhetspåverkan av olika placeringar och därmed krav på att varumärkesföretag ska ha bättre koll på sina materiella hållbarhetsrisker (IVL, 2021).

De **stödjande aktörerna** kan på olika vis underlätta etableringen och acceptans av nya system. Ett tänkbart exempel är LKAB. Genom sitt ReeMAP-projekt planerarbolaget att utvinna fosfor och sällsynta jordartsmetaller ur anrikningssanden från sin egen järnmalmsproduktion (LKAB, 2019). Även om det inte utgör ett sekundärt flöde i den mening vi använder i den här studien (anrikningssanden har aldrig varit produkt) kan det öka intresset för att spåra sällsynta jordartsmetaller. Det är också tänkbart att LKAB på sikt kan återvinna råmaterial ur andra restprodukter också. I så fall skulle LKAB kunna bidra till att realisera en större del av återvinningspotentialen för de här ämnena än vad som kanske vore ekonomiskt försvarbart om enbart de sekundära flödena omfattades. (LKAB skulle samtidigt gå från att vara en stödjande aktör till en användare.) Värt att notera är också att separationstekniken i ReeMAP har utvecklats av EasyMining, ett dotterbolag inom Ragn-Sellskoncernen (LKAB, 2019) och därmed ett annat exempel på det ekosystem av återanvändare som finns och växer fram runt återvinningsföretagen. Andra exempel på stödjande aktörer som kan påverka de primära aktörernas ambitioner på hållbarhetsområdet är icke vinstdrivna och oberoende intresseorganisationer, eftersom de ofta kan påverka allmänhetens/konsumenternas tilltro till olika spårbarhetssystem eller märkningar

(Tillväxtanalys, 2019; IVL, 2021). För kritiska råmaterial kan London Metal Exchange (LME) också bli en mycket viktig stödjande aktör. En stor del av världens metaller handlas via LME med LME-kontrakt (London Metal Exchange, 2019). Till exempel kan en köpare välja att endast köpa *grade A copper cathodes*, vilket garanterar en renhet på minst 99,995 % (Svemin, 2019). LME har påbörjat ett arbete för att integrera OECD Due Diligence Guidance[8] i sina krav på redovisning för att metaller ska kunna säljas som ansvarsfullt framställda (London Metal Exchange, 2019). Framtiden kommer att utvisa om det kommer att driva på utvecklingen av spårbarhetssystem också för kritiska råmaterial och om de systemen i så fall hanterar information på ett sådant sätt att det bidrar till en cirkulär ekonomi.

Systemdesign

Det ligger utanför den här studien att i detalj besvara hur ett fungerande spårbarhetssystem för kritiska råmaterial i syfte att bidra till ökad cirkularitet ska designas. Här avgränsar vi oss till att peka på centrala frågeställningarna om val av chain of custody-modell, om informationen är kvalitativ eller kvantitativ respektive statisk eller dynamisk, om systemet ska spåra råmaterial eller produkt, hur koppling görs mellan fysisk produkt/material och information samt vikten av standardisering. Dessa aspekter utvecklas nedan. Därutöver är de tekniska aspekterna naturligtvis avgörande för ett fungerande spårbarhetssystem men de bör styras av hur systemet designas i övrigt. Det råder heller ingen generell brist på systemutvecklare eller teknikleverantörer med kompetens att tillhandahålla spårbarhetssystem (IVL, 2021; Bergholt, 2021). Ofta nämns blockkedjeteknik[9] i samband med spårbarhetssystem. Det är en teknik som ger ett mycket högt skydd mot manipulation av inrapporterade data, vilket kan bidra till att aktörerna känner tilltro till det tekniska systemet. Samtidigt uppfattas tekniken på sina håll som alltför komplicerad och energikrävande, vilket kan avskräcka aktörer från att medverka (Swedish Lifecycle Centre, 2021; Carlsson, 2021). Det är en utvärdering som behöver göras från system till system. I värde-/försörjningskedjor med ett stort antal transaktioner, många användare och höga krav på automatiserade dataflöden och datasäkerhet är det generellt sett enklare att motivera blockkedjeteknik.

---

[8] Riktlinjerna finns att hämta från https://www.oecd.org/investment/due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct.htm.

[9] En blockkedja är en sorts decentraliserad databas. I stället för att användarna rapporterar sina data till en central operatör av systemet som har ensam kontroll över databasen kontrolleras blockkedjan gemensamt. Användarna kan både lägga in sina data direkt och kontrollera och verifiera varandras transaktioner. På så sätt kan de gemensamt garantera databasens säkerhet.

Valet av chain of custody-modell styr vilken information som kan spåras

Det finns ett antal grundläggande chain of custody-modeller för hur information om material-/produktflöden kan hanteras. Enligt UN Global Compact (2014) *product segregation* (som i sin tur delas in i *bulk commodity* och *identity preserved*), *mass balance* och *book and claim*. Helt kort kräver segregation att de spårade enheterna aldrig får blandas utan måste kunna spåras genom hela värde-/försörjningskedjan medan de andra får det i viss mån. Mass balance innebär att mängden material/produkt med en viss egenskap måste vara densamma in i ett processteg som ut ur detsamma, men egenskapen måste inte följa samma fysiska enheter in och ut. Det finns alltså en koppling mellan egenskap och det fysiska flödet. Book and claim kräver i sin tur bara att det aldrig får finnas mer material/produkt med en viss egenskap i systemet än vad som har tillförts, men egenskapen behöver inte följa flödet. Modellen kallas även *certificate trading* och används till exempel för handel med fossilfri el. Definitioner för modellerna framgår av ISO 22095 och där beskrivs också *controlled blending*, som kan beskrivas som ett mellanting mellan segregation och mass balance (Swedish Lifecycle Centre, 2021). Exempel på olika spårbarhetssystem ges i Figur 14.

Observera att valet av chain of custody-modell begränsar vilken information som hanteras i spårbarhetssystemet (IVL, 2021). Till exempel kräver såväl kvalitativ som dynamisk information (se nedan) identity preserved eller segregation, medan kvantitativ information också kan tillåta övriga chain of custody-modeller (IVL, 2021). Med andra ord är det uppenbart att systemdesignen måste ske iterativt och med aktivt deltagande från värde-/försörjningskedjans olika användare. I en nyligen genomförd analys av förutsättningarna för spårbarhetssystem för ökad cirkularitet av plast pekar Swedish Lifecycle Centre (2021) att både val av återvinningsmetod och framtida applikation av det återvunna materialet kan påverka valet av chain of custody-modell:

> *[S]egregation eller kontrollerad blandning vore möjligt att använda som spårbarhetssystem för mekanisk återvinning eftersom det inte går att blanda olika typer av plaster hur som helst och det är extra svårt och kanske omöjligt för plaster som kommer i kontakt med livsmedel där krav på renhet är extra stort. Massbalans skulle kunna fungera i de fall då man har kemisk återvinning, eftersom plasterna där bryts ner till kortare molekyler och andra kemiska ämnen i processerna.*

EXAMPLES OF EXISTING TRACEABILITY SCHEMES BY MODEL[17]		
PRODUCT SEGREGATION MODEL	**MASS BALANCE MODEL**	**BOOK AND CLAIM MODEL**
• Better Cotton Initiative – Physical segregation until the bale of cotton is formed • Fairtrade Labelling Organizations International (FLO) – Product segregation for bananas, other fresh fruits, coffee, flowers, nuts, rice and spices • Forest Stewardship Council (FSC) – "FSC Pure Products" • Organic Food Labels • Responsible Jewelry Council Chain-of-Custody standard • Roundtable for Sustainable Palm Oil (RSPO) – RSPO Segregated System • Textile Exchange standards • UTZ Certified – Traceability Programme "Segregation Physical Link" • Marine Stewardship Council (MSC)	• Better Cotton Initiative – Mass Balance model once the bale of cotton is broken and split into yarn • Bonsucro – Mass Balance Chain of Custody Standard • Fairtrade Labeling Organization (FLO) – Mass balance model for cocoa, sugar, tea and juice • Forest Stewardship Council (FSC) – FSC volume based system • Roundtable for Sustainable Palm Oil (RSPO) – RSPO Mass Balance System • UTZ Certified – Mass Balance Traceability Programme	• Bonsucro – Credit trading system (Book and Claim) • RSPO – Book and Claim system • UTZ Certified –Trading & Traceability Programme used in collaboration with RSPO

Figur 14. Exempel på olika spårbarhetssystem enligt UN Global Compact (2014).

<u>Olika typer av information: kvalitativ och kvantitativ, statisk och dynamisk</u>

Systemdesignen måste utgå från vilken typ av information som ska spåras. Räcker det att ange om specifika kriterier uppfylls kan kvalitativ information användas. Ett sådant exempel är LME:s grade A copper cathodes som anger en lägsta tillåtna halt av koppar. Om märkningen däremot bygger på kvantitativ information kan den visas graderad. Exempel på detta är EU:s Ecodesign-system och informationsmärkning om koldioxidutsläpp från bilkörning (Tillväxtanalys, 2019). Här krävs ett samarbete mellan återvinnarna och köparna av de återvunna råmaterialen för att avgöra vilken informationstyp som krävs för respektive råmaterial. Det verkar som att primära aktörers respons på reglering är kvalitativ information (*good enough*), men att kvantitativ information krävs för att svara på (professionella) kunders efterfrågan och som ett sätt att kunna differentiera olika erbjudanden (*premium products*) (IVL, 2021).

För vissa flöden ändras egenskaperna under livscykeln och i dessa fall måste spårbarhetssystemet kunna hantera att data förändras när genom värde-/försörjningskedjan, så kallade dynamiska data. Svemins pilotsystem TraceMet är ett exempel på det. TraceMet undersökte möjligheterna att spåra klimatavtryck och

andel återvunnet råmaterial från gruva till varumärkestillverkare (IVL, 2021). I varje led av värdekedjan ändras materialets klimatavtryck som ett resultat av förädlingen, vilket spåras i systemet. Motsatsen till dynamiska data är statiska data. Syftar spårbarhetssystemet enbart till att underlätta återvinning bör det vara tillräckligt med statisk information om produktens materialsammansättning. Ska systemet dessutom underlätta återanvändning kan det däremot krävas dynamisk information om hur produkten har använts för att kunna avgöra till exempel återstående kapacitet eller kondition hos en battericell (Stena Recycling Group, 2021). Här börjar det också bli uppenbart att det är skillnad på att spåra råmaterialet genom värde-/försörjningskedjan och att spåra produkten. Marknadslogiken för många metaller, bland annat järn/stål och koppar, talar för att använda mass balance eftersom både primära och sekundära råmaterial från olika gruvor och återvinnare blandas i smältverken (Svemin, 2019). Krav på segregering så här tidigt i värde-/försörjningskedjan medför därmed stora förändringar i metallförädlingsprocessen.

När materialet har blivit till en produkt är det sannolikt nödvändigt att spåra materialet indirekt, genom information om produkten. Det innebär antingen att olika spårbarhetssystem behöver kunna kopplas samman eller, som tidigare har nämnts, att värde-/försörjningskedjan förenklas så mycket att spårbarhetssystemet kan skräddarsys för ett flöde. Det eventuella behovet av att kunna koppla samman olika system är ett starkt argument för standardisering (Carlsson, 2021), som vi strax återkommer till.

Vad som de facto ska spåras

Möjligheterna att manipulera informationen i systemet både genom misstag och medvetet, måste hållas tillräckligt små. En delutmaning är att eliminera risken för att koppla digital information till fel fysisk enhet. Den utmaningen är särskilt stor i de fall det är svårt att följa de fysiska materialflödena i teknosfären i sig (Karim, 2021). För chain of custody-modeller som följer fysiska flöden eller enheter kan det ske med hjälp av en stämpel, genom kemisk spårning eller i dokument (Tillväxtanalys, 2019). Vid certifikathandel (book and claim) hanteras mängden materia och hållbarhetsinformationen var för sig genom hela leverantörskedjan. Det kan vara aktuellt när separation av metaller eller fysisk spårning är svårt att genomföra tekniskt, eller när kostnaden blir för stor (Tillväxtanalys, 2019). Den här kopplingen är en (av flera) avgörande komponenter för att skapa tilltro och därmed acceptans för ett spårbarhetssystem.

Som ett alternativ eller komplement till spårbarhetssystem utvecklas tekniska system för att identifiera produkter eller material vid återvinning. Två svenska

exempel är Siptex[10] för textil och SenSoRe[11]. Till skillnad från pantsystemet för returburkar och returflaskor läser de här systemen inte av en märkning på produkten utan försöker självständigt identifiera det, vilket kan vara intressanta komplement till spårbarhetssystem för kritiska råmaterial.

Standardisering

Standardisering är en möjlighet för att dela data i komplexa värde-/försörjningskedjor. Även med slutna kedjor är det troligt att flera sektorer berörs, vilket gör att standardisering är värdefull (Carlsson, 2021). Standardisering är också en viktig komponent för att skapa acceptans för systemet genom att skapa transparens för hur systemet är designat och hur det ska användas. Acceptansen kan främjas ytterligare genom att utforma systemet så att det blir möjligt för en oberoende extern part att verifiera att data har tagits fram och rapporterats in i enlighet med (den standardiserade) instruktionen. OECD Due Diligence Guidance tas upp av flera aktörer som en användbar grund för ett standardiserat arbetssätt för hållbarhetsarbete (Tillväxtanalys, 2019; UN Global Compact, 2014). Ett tredje argument för standardisering är att det bidrar till en positiv spiral där ett system som vinner bredare acceptans och är enklare att ansluta sig till både kan motivera aktiva användare att upprätthålla och öka sina ansträngningar på området och öka trycket på de aktörer som står utanför att ansluta sig (Hemmelberg & Hanna, 2021). Eftersom värde-/försörjningskedjor för eller senare förgrenar sig över flera samhällssektorer måste standarderna vara sektorsoberoende, varför ISO-standarder är att föredra (Carlsson, 2021). Krav på standardisering kan ställas i flera led i användarkedjan.

Hinder och utmaningar

En av de största utmaningarna för att etablera fungerande spårbarhetssystem för att främja återanvändning och återvinning av kritiska råmaterial är sannolikt att nå en kritisk massa av användare. Det är nödvändigt att täcka in en tillräckligt stor del av de aktörer som ingår i värde-/försörjningskedjorna för de material som omfattas. Tilltron till systemet en av de viktigaste nycklarna för att åstadkomma detta. Delförklaringar till att enskilda aktörer kan vara avvaktande eller negativa till att medverka till spårbarhetssystem är otydligt ägarskap av frågan mellan och inom aktörer, otydliga spelregler och kunskapsbrist samt att det är en komplex

[10] Siptex är världens första automatiska storskaliga anläggning för textilsortering och sorterar textil efter färg och fibersammansättning (Sysav, 2021).

[11] SenSoRe är en testbädd där företag kan testa, verifiera eller utveckla sorteringsgtekniker inom återvinning (Swerim, 2021). Bland annat har försök gjorts av automatiserad kvalitetskontroll av non-ferrous-fraktioner och sortering av svåridentifierade plastfraktioner.

frågeställning som ställer krav på långsiktighet. Det här olika typerna av hinder utvecklas nedan.

Otydligt ägarskap mellan och inom aktörer leder till osäkerhet

För många aktörer är det fortfarande otydligt hur transformationen till en mer cirkulär ekonomi kommer att påverka dem under och efter omställningen. Spårbarhet kan kopplas till miljö, klimat och hållbarhet, råvaruförsörjning, försäljning, utveckling eller kvalitet. Varje områden har sannolikt organisatoriska mål som kräver någon form av spårbarhet, åtminstone av den egna processen, för att kunna följa upp. Högsta ledningens engagemang är därför en viktig intern framgångsfaktor (Hemmelberg & Hanna, 2021). Vissa aktörer väljer att agera tidigt och ta initiativ på området, bland annat för att positionera sig och se till sina intressen. Det har inneburit att det i dagsläget pågår flera parallella initiativ till spårbarhetssystem med anledning av batteriförordningen. Det finns exempel på när en alltför stark drivkraft att stärka den egna positionen gentemot konkurrenternas har lett till att märkningssystem inte har uppfyllt samhällets mål att bidra till mer hållbara produkter (Tillväxtanalys, 2019). Det finns även tendenser till att mer resurssvaga intressenter inte har kapacitet att delta i utvecklingen av spårbarhetssystem (Tillväxtanalys, 2019).

Otydliga spelregler ökar osäkerheten hos enskilda aktörer

Det finns en otydlighet om formella spelregler och kunskapsbrist om informella spelregler. Formella spelregler syftar här på regleringar i form av lagstiftning och upphandlingskrav. Med informella spelregler avses förutsättningar som aktörerna måste förhålla sig till men inte är tvingade att följa. EU:s pågående arbete med batteridirektivet är ett tydligt exempel på snabb utveckling av formella spelregler. Informella spelregler omfattar till exempel vilken betalningsvilja som faktiskt kommer att finnas hos privatkonsumenter och professionella konsumenter för de produkter som nyttjar spårbarhetssystemen. Förenklat kommer sekundära råmaterial även i framtiden att konkurrera med primära råmaterial (Stena Recycling Group, 2021). I de fall de sekundära är dyrare, och inte främjas i tillräcklig utsträckning av de formella spelreglerna, måste mellanskillnaden motiveras med en högre betalningsvilja. En närbesläktad utmaning är att se till att investerare, konsumenter och producenter har tillräcklig kunskap för att kunna värdera den information som spårbarhetssystemet tillhandahåller (Tillväxtanalys, 2019). Olika aktörer kan komma till de motsatta slutsatserna att antingen avvakta resultaten av den utvecklingen (Hemmelberg & Hanna, 2021) eller att tvärtom agera tidigt för att försöka säkerställa att utvecklingen tar tillräcklig hänsyn till egna prioriteringar (Svemin, 2021). Båda förhållningssätten kan vara rationella beroende på utgångspunkt.

Ett annat exempel på otydliga spelregler är hur informationssäkerheten i spårbarhetssystemen ska hanteras. Det här omfattar både att data beräknas och rapporteras på ett korrekt och tillförlitligt vis och att inrapporterad data varken riskerar att gå förlorad eller kan manipuleras på felaktigt vis efter inrapportering, och att systemet kan designas så att nödvändig information delas mellan aktörer

utan att äventyra affärshemligheter (IVL, 2021; Hemmelberg & Hanna, 2021; Bergholt, 2021). Delvis är de här hindren kända och hanterade sedan tidigare, genom en kombination av standardisering, oberoende verifiering och revision, samt IT-säkerhetslösningar.

Asymmetrisk information bidrar till komplexitet och krav på långsiktighet

Spårbarhetssystem är mycket komplexa i flera avseenden. Detta kan vara avskräckande särskilt för mindre aktörer (Bergholt, 2021). Till att börja med råder det brist på efterfrågade data hos många aktörer – vilket är ett av behoven som spårbarhetssystemet ska uppfylla – vilket leder till asymmetrisk information aktörer emellan (Tillväxtanalys, 2019). Det saknas i många fall en gemensam helhetsbild av vilka data som finns, vilka som behövs och därmed vilka luckorna är. När data också ska användas av aktörer upp- och nedströms kan det innebära förväntningar på att samla in data som inte efterfrågas av den egna organisationen. Det här blir en del i de nya samarbeten som krävs, inte bara för ett fungerande informationsutbyte utan också med systemstödjande aktörer[12] och i de fall spårbarhetssystemet och omställningen till en mer cirkulär ekonomi leder till nya affärsmodeller. Eftersom informationsutbytet i ett fungerande spårbarhetssystem i komplexa och globala värde-/försörjningskedjor måste vara automatiserat, krävs sannolikt en omfattande process- och systemintegration både inom och mellan aktörer (RISE, 2020). Exempel på processer som kan behöva inkluderas är produktion, logistik, inköp och försäljning. Att övervinna tillräckligt många av de hinder som står i vägen för fungerande spårbarhetssystem kräver uthållighet och långsiktighet. Insamling av data som efterfrågas av aktörer utanför den egna organisationen, liksom att ta emot information utifrån, är fortfarande i många fall ett manuellt arbete (Hemmelberg & Hanna, 2021). Det är arbetskrävande och resulterar samtidigt i att kvalitén på data blir låg eller svårverifierad (Hemmelberg & Hanna, 2021). Även den motsatta situationen, att data samlas in i stor utsträckning, innebär utmaningar. Automatiserad insamling av till exempel processdata leder snabbt till stora datamängder. Samtidigt som stora datamängder innebär möjligheter att extrahera information som annars inte är möjlig att få ställer det i sig krav på specialistkompetens och särskilda verktyg för att kunna analyseras på ett meningsfullt vis (Källström, 2021; Bergholt, 2021; Fransén, 2021). I de flesta fall kommer inte ett spårbarhetssystem i sig kräva insamling av stora datamängder, men det finns en risk för att vissa nya data behöver samlas in. Det kan i sin tur öppna upp för samordning med datainsamling av andra skäl som kan öka komplexiteten i de interna besluten (Källström, 2021). Slutsatsen blir att den sammanlagda komplexiteten är både kostnads- och resurskrävande (UN Global Compact, 2014; Bergholt, 2021). Det är nödvändigt men inte självklart att aktörernas drivkrafter är starkare och att möjligheten att nå cirkulär lönsamhet större än det motstånd och de kostnader som hindren utgör.

[12] Till exempel teknikleverantörer samt certifierings- och revisionsorganisationer.

Rekommendationer för fortsatt arbete

Identifiera de viktigaste kritiska råmaterialen ur ett svenskt perspektiv

För att kunna fördjupa analysen av vilka kriterier som är lämpliga för utformningen av framtida spårbarhetssystem, liksom av vilka hinder som behöver undanröjas är det därför nödvändigt att konkretisera vilka råmaterial som ska följas.

De totalt 52 råmaterial som ingår i den här studien är en rimlig utgångspunkt. Av dem har vi givit hög prioritet till 19 material som är nödvändiga för tillverkning av klimatvänliga energitekniker. Enligt vår uppfattning är det lämpligt att, inom den gruppen, välja ämnen som uppfyller ett eller flera av följande urvalskriterier:

- Råmaterialet förekommer, eller bedöms inom en nära framtid förekomma, i betydande sekundära flöden i den svenska teknosfären. Observera att storleken på flöden snarare bör mätas i kronor än kilogram, både för att råmaterialen hanteras i vitt skilda mängder och för att investeringsvilja ofta relaterar till värden. Det omfattar ämnen som ingår i produkter, till exempel klimatvänliga energitekniker, som kommer att användas i Sverige. För att ge upphov till betydande mängder krävs att råmaterialet antingen förekomma i stor mängd i varje produkt, produkten förekomma i stort antal eller både och. Dessutom måste produkten ge upphov till ett tillräckligt stort sekundärt flöde. Storleken på det sekundära flödet styrs av en kombination av i vilken takt och mängd materialet tillförs teknosfären och hur lång uppehållstiden är. Kartläggningen visar till exempel att uppförda vindkraft- och solcellsanläggningar i Sverige ännu inte har börjat avvecklas i sådan omfattning att det urskiljs i tillgängliga data.
- Det finns en befintlig eller framväxande bransch för återanvändning och återvinning inom landet. I övergången från linjära till cirkulära värde-/försörjningskedjor är det nyckelaktörerna som bör vara drivande eller åtminstone engageras i ett tidigt skede för att etablera spårbarhetssystem. Från en svensk horisont är det därför enklare att både motivera och konkretisera system som möjliggör eller underlättar återanvändning och återvinning av råmaterial som hanteras av aktörer i Sverige. De ekosystem som växer fram kring de klimatvänliga energiteknikerna är därför av särskilt intresse. I den här studien finns flera exempel på sådana aktörer. Detta står inte i konflikt med att underlätta för etableringen av spårbarhetssystem för sekundära flöden som omhändertas i andra delar av världen, utan ska bara läsas som att initiativ till de systemen lämpligen tas av aktörer verksamma i de länder där råmaterialen i fråga återvinns.
- Den potentiella räckvidden för ett spårbarhetssystem överensstämmer tillräckligt väl med råmaterialets marknad. En kritisk framgångsfaktor är att en tillräckligt stor andel av värde-/försörjningskedjans aktörer ansluter sig. Det är naturligtvis enklare att uppnå för ett råmaterial som hanteras av färre aktörer än av fler, antingen för att på grund av att den handlas på en regional marknad eller i slutna värdekedjor.

Genomför en detaljerad aktörsanalys

För att uppnå nödvändig samverkan mellan aktörerna är första steget att ta reda på vilka aktörer som ingår i värde-/försörjningskedjan för de eller det råmaterial som ska spåras. Därutöver är det nödvändigt att beskriva marknadslogiken för råmaterialet. Det första steget identifierar vilka aktörer som ska ingå i analysen, det andra ger ramarna för att förstå aktörernas drivkrafter och möjligheter att nå cirkulär lönsamhet genom en bättre spårbarhet. Sammantaget kan det både ställa krav på och sätta gränser för valet av chain of custody-modell och, i sin tur, vilken typ av information som förmedlas via systemet.

Aktörsanalysen kan lämpligen göras enligt den indelning i primära, sekundära och tertiära aktörer som används i den här studien, med störst fokus på de primära och lägst på de tertiära. För var och en av de identifierade nyckelaktörerna bör deras relativa ”tyngd”, deras drivkrafter och mognadsgrad med avseende på spårbarhet i den mening som vi diskuterar här analyseras. Det kommer att ge ett underlag för att beskriva förutsättningar och hinder för det specifika spårbarhetssystemet, vilket i sin tur blir styrande för följande steg. I en situation med en ensam eller få enstaka dominerande aktörer, med en stark drivkraft att uppnå återvinning och stor förförståelse av spårbarhetssystem kan fokus tidigt läggas på systemdesignen. Karaktäriseras i stället värde-/försörjningskedjan av många aktörer med låg interaktion, linjära affärsmodeller och begränsad digitalisering kommer fokus inledningsvis sannolikt att behöva läggas på aktörssamverkan och kunskapshöjande insatser.

Genomför en styrmedelsanalys

Baserat på kunskapen från aktörsanalysen bör en bredare styrmedelsanalys genomföras. Ett återkommande konstaterande är att aktörernas vilja att medverka i ett spårbarhetssystem kräver en tillräckligt tydlig cirkulär lönsamhet. Det gäller i särskilt hög grad för spårbarhetssystem som bygger på frivillighet. Det här kan stimuleras genom offentlig upphandling. En övergripande frågeställning är om en ökad cirkularitet bäst uppnås genom reglering eller stimulans eller en kombination och vilka behov ett spårbarhetssystem behöver fylla för att uppnå önskade resultat.

Ett hypotetiskt exempel på en oönskad rekyleffekt är införandet av ett långtgående kvotpliktsystem för något kritiskt råmaterial. Målet med styrmedlet är att premiera en funktionell återvinning av det aktuella materialet. Är styrmedlet framgångsrikt kommer det samtidigt att leda till en minskad återanvändning av de produkter som innehåller råmaterialet. I de fall det tillgängliga sekundära flödet är för litet för att tillgodose efterfrågan kan det också leda till en minskad total produktion av en klimatvänlig energiteknik. Orsaken kan både vara tekniska begränsningar i återvinningen eller att det sekundära flödet totalt sett är för litet.

Fokus i den här delen av studien ligger på spårbarhetssystemet. Det är värt att påminna om att det enbart är ett medel för att nå målet, en ökad cirkulär ekonomi. Därför är det viktigt att en styrmedelsanalys utgår från vilket slags cirkularitet som ska uppnås för respektive råmaterial. Med den utgångspunkten går det sedan att

analysera om ett visst spårbarhetssystem kan förväntas styra effektiv mot det målet eller ej. Ett exempel är designen av fordonsbatterier. Det är möjligt att optimera designen för återanvändning, till exempel genom att enskilda celler byts. Det kan leda till mer materialintensiva och tyngre produkter om modulariteten kräver fler komponenter, infästningar med mera. Det innebär en högre energiförbrukning både vid tillverkning och framför allt under användning eftersom fordonet totalt sett blir tyngre. Likaså kan det låsa in både teknikval och råmaterial under längre tid och på så vis bromsa teknikutveckling och effektivisering. Med ett annat synsätt kan motsatsen också hävdas. Optimeras designen för effektiv återvinning kan det leda till att batteriet får kortare total uppehållstid i teknosfären, vilket generellt anses vara negativt ur ett resurshållningsperspektiv. Risken för rekyleffekter återkopplar delvis till marknadslogiken och måste beaktas för varje kombination av styrmedel och råmaterial.

En annan aspekt i styrmedelsanalysen mer direkt kopplad till designen av spårbarhetssystemet är vikten av teknikneutralitet, bland annat för att främja interoperabilitet mellan olika system inom och mellan olika aktörer samt skalbarhet. Eftersom det finns en koppling mellan funktionalitet och val av teknik bör systemdesignen definieras innan tekniken väljs, snarare än tvärtom. Potentiella teknikleverantörer kan definitivt spela en roll redan tidigt i processen genom att bidra med kunskap om alternativ och alternativens styrkor och svagheter.

Metod för kommande kartläggningar

Den här studien är det första försöket att kartlägga sekundära flöden av kritiska råmaterial i den svenska teknosfären. Sedan tidigare finns det alltså ingen etablerad metod för att genomföra en sådan kartläggning eller förkunskap om vilka relevanta data som fanns tillgängliga. Ett av studiens huvudmål är därför att tillvarata de erfarenheter som har gjorts under arbetets gång och utveckla metoden samt beskriva datatillgång inför kommande fördjupade eller kompletterande kartläggningar. Som beskrivs i kapitlet Material och metod ovan var den ursprungliga ambitionen att sammanställa data och beräkna sekundära flöden på ett enhetligt vis för samtliga prioriterade ämnen. Som också framgår ovan visade sig datatillgången vara alltför begränsad för att lyckas med det i den här studien. Identifierade dataluckor kommenteras för vart och ett av de kartlagda råmaterialen ovan.

Den föreslagna metoden bedöms ändå vara värd att sträva efter i kommande kartläggningar. Grundläggande för den föreslagna strukturerade modellen är att den ska balansera inflöden, utflöden och ackumulerade mängder av kritiska material.

$$F_{ut} = F_{in} - \Delta A$$

Där F_{ut} är utflödet av ett kritiskt råmaterial, det vill säga den mängd som går till någon form av återvinning ett visst år, F_{in} är inflödet av samma kritiska råmaterial och ΔA är förändringen i ackumulerad mängd av materialet i teknosfären.

En sådan modell behöver kontinuerligt uppdateras för att spegla den situation som råder för kartläggningen. En sådan modell eller databas skulle underlätta jämförelser och tolkning av resultat, hantering av osäkerheter samt analys av förändringar över tid, utöver att snabba upp analysen väsentligt. Dessa nyttor måste naturligtvis vägas mot ansträngningen som krävs för att samla in nödvändiga grunddata. Utmaningarna som den här studien har ställts inför pekar på att det krävs en stor inledande ansträngning att bygga upp en tillräckligt heltäckande modell och databas och därefter uppdatera denna kontinuerligt under en period. Oavsett ambitionsnivå för kommande kartläggningar är det nödvändigt att aktörer på marknaden blir intervjuade för att få svar på de frågor som inte går att få fram från statistikdatabaser och liknande.

Det bedöms vara enklare att samla in data för inflöde än för utflöde. Förslaget blir därför att det totala utflödet, F_{ut}, av ett enskilt råmaterial kan uttryckas som:

$$F_{ut} = \sum_n F_{in} * P_n$$

Där n är ett enskilt år under den studerade perioden och P_n är sannolikheten att produkten från året n ska bli avfall under innevarande år eller andelen som blir avfall. Det totala inflödet, F_{in}, varierar också från år till år och kan i sin tur uttryckas som:

$$F_{in} = M_n * C_n$$

där M_n är mängden av produkten beräknat utifrån nettoimport och produktion under året n och C_n är koncentrationen av det kartlagda ämnet (kritiska råmaterialet) i produkten taget från databasen för materialsammansättning.

För båda flöden beräknas summan över alla år och tar då hänsyn till att alla parametrarna M, C och P kan variera från år till år.

Eftersom både den här och andra studier (till exempel SMED, 2020) har konstaterat att avfallsstatistiken för sekundära flöden är otillräcklig för den här typen av kartläggningar bedöms en materialflödesmodell ge bättre resultat. Det gäller särskilt för komplexa produkter som består av många olika material, vilket ofta är fallet för kritiska råmaterial. Det modellerade flödet består av en kombination av produktions- och konsumtionsdata. Produktionsdata består av balansen mellan inhemsk produktion och import å ena sidan och export å andra sidan. Konsumtionsdata har generellt hög precision. Från litteratur och information direkt från industriella samarbetspartners samlas det in data för materialsammansättning på produkter, det vill säga koncentrationer av olika råmaterial. Materialsammansättningar varierar mellan olika produkter av samma typ och kan även förändras med tiden. Dessa data sparas därför i en databas som uppdateras efter hand som det finns nya data tillgänglig. Data för inflöden och materialsammansättning kombineras sedan med en modellerad livslängd för alla produktkategorier (eller produkter) som det finns data för. Modellen för livslängd bör använda en fördelningskurva, i stället för att ansätta ett värde som har varit

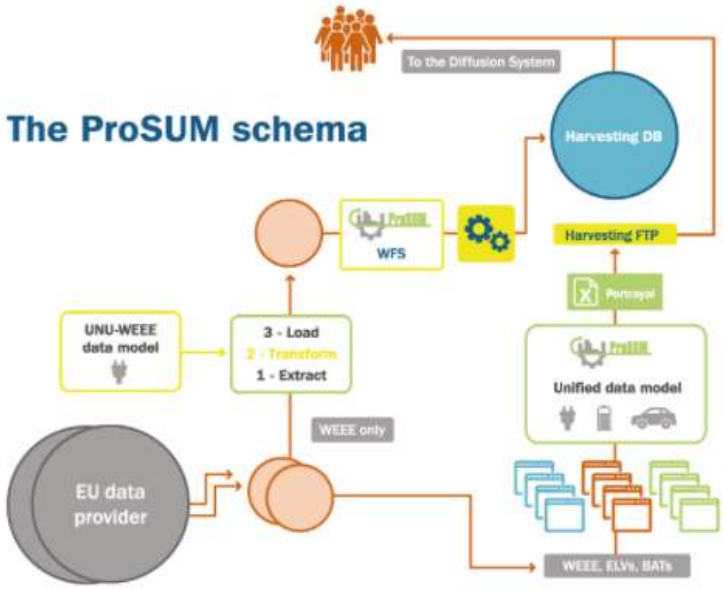
nödvändigt i den här studien. Sammantaget skulle detta tillåta noggranna och transparenta beräkningar av inflöde för varje material.

En nackdel med att modellera är att modeller bygger på antaganden. För att bekräfta riktigheten i beräkningarna är det därför lämpligt att också försöka beräkna utflödena direkt från data för insamling, materialbehandling och återvinning för respektive kritiskt råmaterial. Ovan ges åtskilliga exempel på att olika sekundära flödesvägar skiljer sig åt mellan olika material. Det innebär att det krävs individuella modeller som beaktar de olika steg i insamling, materialbehandling och återvinning som produkten/produktkategorin och i förlängningen råmaterialet passerar i slutet av livscykeln. Även i detta steg krävs specifika data för alla produktkategorier (eller produkter). Material antas gå förlorat i flera av stegen och detta värde tas också fram för varje produkt. Att förbättra statistiken genom att tillsätta fler mätpunkter eller göra ändringar i avfallskategorier är också ett sätt som kan förenkla och förbättra översyn på flöden av sekundära material i Sverige och på så vis minska behovet av den typ av kartläggning som diskuteras här.

Det är nödvändigt att uppdateringar görs för att modellen ska visa en korrekt bild av verkligheten. Till exempel så bör livslängden på produktkategorierna uppdateras eftersom de kritiska materialen ofta finns i innovativa produkter som ofta saknar tillförlitliga uppgifter om uppehållstider på grund av snabb teknikutveckling och att de bara har hunnit ha en kort förekomst i teknosfären. Ett exempel är litiumjonbatterier i bilar vars genomsnittliga livslängd har förlängts något idag jämfört med skattningar för några år sen. Uppdateringar i rådata som import/export och materialsammansättning tas naturligtvis också med i modellen. Som exempel kan uppdateringar göras med hjälp av expertkunskap eller stickprov. Modellen kan behöva anpassas för att det i vissa fall är lämpligt att utgå från produktens vikt och i andra fall är det lämpligare att utgå ifrån det ekonomiska värdet på produkten, eller någon annan redovisad kategori i data för import/export/produktion.

Den standardiserade beräkningsmodell som beskrivs ovan är inte begränsad till kritiska råmaterial utan skulle kunna utvidgas till fler material förutsatt att det går att samla in tillräckliga data. Exempel på material är nickel, mangan och koppar, som är särskilt intressanta ur ett svenskt perspektiv eftersom de används och kommer att användas i stor utsträckning för bland annat tillverkning av elbilsbatterier. Dessa metaller beskrivs, tillsammans med många andra råmaterial i Non-Critical Raw Material Factsheets (European Commission, 2020d) på liknande vis som EU-kommissionen beskriver de kritiska råmaterialen. Andra tänkbara tillämpningar är kartläggning av sekundära flöden av plast och giftiga ämnen.

För mer inspiration på modellens uppbyggnad bör modeller framtagna av andra experter förslagsvis konsulteras. Ett bra exempel är EU-projektet ProSUM (Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes) med tillhörande Urban Mine Platform (Urban Mine Platform, 2018) där bland annat Chalmers är partner. Projektet slutade 2017, men databasen är fortfarande i gång, och mycket av metodiken kan vara till nytta vid modellering, Figur 15.



Figur 15. Datamodell från ProSUM-projektet som visar datakällor, modeller, länkar mm. för att kontinuerlig uppdatering av sekundära råvaruflöden (ProSUM, 2022).

Ett annat exempel är den plastkartläggning som ska publiceras under 2022 (Fråne et al., 2022), där kartläggningen av användningen till stor del bygger på samma metodik men avfallsflödet är mer baserat på insamlade och hanterade mängder än på den modellerade livslängden som vi föreslår här. Det ser även ut som om det norska projektet PLASTCYCLE har en kartläggning som baseras på ungefär samma princip, men det är än så länge oklart då det inte har publicerats några artiklar från det projektet än. Projektet är planerat att pågå 2020–2023 (Plastcycle, 2022). Utifrån författarens egen beskrivning av den framtagna data i CES (2020) misstänker vi även att CES (2021) använder sig av en liknande princip i deras kartläggning av litiumjonbatterier, men det är inte bekräftat.

Samlad diskussion och slutsatser

Huvudmålet med den här studien är att kartlägga sekundära flöden av kritiska råmaterial. Det var medvetet ambitiöst formulerat och under arbetets gång visade det sig att det saknas tillförlitliga uppgifter på koncentrationer av kritiska råmaterial i produkter och uppgifterna är än bristfälligare för avfallsflödena. En inledande och övergripande slutsats blir därför att det saknas statistik för metallanvändning. Det gäller inte enbart de kritiska råmaterialen, för vilka det i hög grad även saknas statistik för produktion och avfall, utan samtliga metaller.

Det blev nödvändigt att göra en prioritering av vilka råmaterial som skulle kartläggas mer ingående. Utifrån genomförd litteraturstudie och statistikgenomgång bedömdes 19 råmaterial ha hög prioritet på grund av deras betydelse för klimatvänlig energiteknik. Av dessa bedöms i första hand kobolt, koppar, mangan, neodym, nickel, niob, platinagruppsmetaller och titan ge upphov till sekundära flöden som både är, eller bedöms inom en snar framtid bli, funktionellt återvinningsbara och av tillräckligt stor ekonomisk betydelse för att motivera investeringar i återvinning.

Den här studien har genomfört fördjupade kartläggningar av kobolt, neodym, platinagruppsmetaller samt indium. Indium inkluderades trots att förutsättningarna för återvinning bedöms vara små på grund av att det är viktigt vid produktion av solceller. Resultatet visar att det är möjligt att göra en ordentlig kartläggning.

Likheter och skillnader mellan sekundära flöden av fyra olika kritiska råmaterial

En närmare granskning av flödena för kobolt, platinagruppmetaller, neodym och indium utfördes då de i den här studien ansågs extra viktiga för en svensk energiomställning. Dessa material kan spela en viktig roll i batterier för en elektrifierad fordonsflotta, elektrolysörer och bränsleceller för framställning och användning av vätgas, motorer och generatorer för elfordon och vindkraft samt för solceller. Från denna granskning kan följande slutsatser dras:

- Kobolt används i dagsläget huvudsakligen inom legeringar och den återvinning som sker i Sverige idag går framför allt från skrot till legeringar. Användningen bedöms öka kraftigt i form av batterier, vilket också medför att det avfallsflödet kommer att öka (med en viss fördröjning). Northvolt har visat tydliga planer på att hantera detta flöde, dels genom cirkulär design av sina produkter, dels genom att utvinna en stor del av sitt råvarubehov från uttjänta batterier och industrispill.
- Platinagruppmetallerna används i dagsläget huvudsakligen i fordonskatalysatorer för att rena avgaser från förbränningsmotorer. Återvinning som sker i Sverige i dagsläget kommer dels från elektronik, dels från fordonskatalysatorer. Återvinningen inkluderar i dagsläget inte

någon raffinering till rena metaller utan sker i form av att utvinna ett koncentrat av platinagruppmetaller som skickas på export för raffinering utomlands. Med den utveckling som spås inom transportsektorn så kommer PGM-behovet att minska. Den mängd platinagruppmetaller som förutspås behövas i elektrolysörer och bränsleceller är betydligt mindre än minskningen från fordonskatalysatorer, vilket innebär att totala behovet ser ut att minska.

- Neodym används huvudsakligen i form av magneter vilket än så länge framför allt används i andra produkter än vindkraft och elbilar. Elektrifieringen av transportsektorn och utbyggnaden av vindkraft driver på behovet av neodym. Neodym från magneter återvinns inte i dagsläget annat än på forskningsnivå men med de satsningar på utvinning av sällsynta jordartsmetaller som är på gång inom Sverige och med det ökade (globala) behovet av neodym som förutspås så är det sannolikt att en återvinning är på gång inom en överskådlig framtid.
- Indium används i dagsläget huvudsakligen i form av ett transparent och elektriskt ledande tunt skikt av indium-tenn-oxid (ITO) framför allt i plattskärmar (för exempelvis TV, dator, mobil). Materialet bedöms inte vara cirkulerbart från uttjänta produkter inom en snar framtid då det krävs stora mängder material för att återvinna en liten mängd indium (dissipativ användning). Industrispill är däremot återvinningsbart, då koncentrationen av indium är betydligt högre och det uppstår dessutom en stor mängd industrispill från de applikationer som indium används inom. Mängden indium i konventionella solceller är en osäker uppgift, men det ser ut som att användningen av indium kan komma att öka i takt med behovet av solceller. Det används än så länge relativt lite solceller i Sverige, men det sker en hög relativ ökning varje år.

Generellt innebär omställningen av energi- och transportsektorerna ett kraftigt ökat metallberoende. Exemplet med platina visar samtidigt att behovet av vissa specifika tillämpningar samtidigt kommer att minska och därmed frigöra materialresurser. Det gäller både det sekundära råmaterialet, om det kan omhändertas med funktionell återvinning, och det primära råmaterialet eftersom gruvornas produktionskapacitet, åtminstone i ett kort tidsperspektiv, är oberoende av fluktuationer i efterfrågan.

Livslängden för de produktkategorier som utgör huvuddelen av de flöden som har studerats närmare varierar från enstaka år (konsumentelektronik) till några tiotals år (fordon, vindkraftverk, solcellspaneler). Det betyder att det sker motsvarande fördröjning mellan storskalig introduktion av nya produkter eller tekniker och återvinning av samma ström. I en tid när klimatomställningen behöver ske mycket snabbt kan det finnas en risk för att en tidshorisont på några decennier gör att frågan om återvinning hamnar i skymundan. Northvolts uttalade fokus på en cirkulär affärsmodell, med motiveringen att det är nödvändigt för att säkra råmaterialtillgången pekar dock på att den risken inte ska överdrivas.

Kriterier för en funktionell återvinning

Den här studien har inte tagit ställning i frågan när det är önskvärt att maximera en produkts livslängd jämfört med att ersätta den med en mer effektiv produkt och återanvända alternativt återvinna den. Det är uppenbart att klimatomställningen bland mycket annat förutsätter en effektiv resursförvaltning där både primära och sekundära råmaterialflöden kommer att vara nödvändiga parallellt. Det betyder att det generellt är önskvärt med en ökad funktionell återvinning, men också att återvinningsprocessen måste ge en nettonytta. Det finns bortre gränser för när det är praktiskt möjligt att återvinna material. Studien identifierar ett antal kriterier för en ökad funktionell återvinning av kritiska råmaterial:

- De material som återvinns i dagsläget är framför allt de material som har ett högt totalt värde. Ett sådant exempel är koppar där den totala användningen av koppar i Sverige har uppskattats till ett värde i storleksordningen av miljarder kr per år. Hafnium å andra sidan har en total användning i Sverige som uppskattats till hundratusentals kr per år vilket gör att en investering i anläggningar för att återvinna hafnium behöver vara mycket billiga för att det ska löna sig ekonomiskt. Energiförbrukningen vid primär respektive sekundär framställning påverkar också den ekonomiska (och miljömässiga) lönsamheten. Ett vanligt exempel är aluminium. Det krävs 13 kWh/kg för att utvinna aluminium ur bauxit, men återvinning från skrot innebär en energibesparing på upp till 95 % (Svenskt Aluminium, 2022)
- Det har också framkommit att återvinning går hand-i-hand med produktion från primära råvaror. Det är ofta stora aktörer som redan har en process i gång för att hantera materialet som också passar på att ta in en sekundär råvara som en del i sitt befintliga flöde. Några exempel på detta är Boliden och Umicore. Ett undantag från den här tumregeln är Northvolt, där strategin snarare ser ut att handla om att säkra tillgång till råvaror på en snabbt växande marknad.
- Andra faktorer som spelar roll för återvinningen är dissipativ användning, konkurrens med annan utvinning eller att materialet förbrukas vid användning. Med dissipativ användning menas att materialet används i små mängder eller låga koncentrationer i produkterna vilket gör återvinningsprocessen dyrare. Konkurrens med annan utvinning sker exempelvis i form av att flera av de kritiska råmaterialen utvinns som biprodukter från annan råvaruframställning vilket medför att det ibland är mer lönsamt att öka mängden utvunnen biprodukt än att öka återvinningen. För vissa material såsom koks och naturgummi sker en omvandling av materialet som innebär att de förbrukas vid användning vilket också medför att de inte kan återvinnas.

Spårbarhetssystem kan stimulera ökad återvinning

Den globala konkurrensen om batterimineral har redan lett till ett antal initiativ från bland annat EU, branschorganisationer och enskilda företag som tydligt visar att spårbarhetssystem kan vara en nyckel för ökad återvinning. Denna studie tar upp både EU:s nya batteriförordning och Northvolts planer på återtag och återvinning av elfordonsbatterier som konkreta exempel på detta.

Den främsta framgångsfaktorn för att etablera fungerande spårbarhetssystem är samarbetet och tilliten mellan värde-/försörjningskedjans olika aktörer. Det här är i många fall en stor utmaning eftersom råmaterial och produkter flödar i komplexa, ofta globala nätverk. Två komplementära ansatser för att hantera den här komplexiteten och skalan är att fokusera på de viktigaste flödena och att försöka skapa slutna system.

Drivkraften för enskilda aktörer att medverka i spårbarhetssystem kan både vara extern (uppfylla lagkrav) och intern (uppfylla interna mål, cirkulär lönsamhet), vilka kan stimuleras genom både lagstiftning och offentlig upphandling. En annan framgångsfaktor är en ändamålsenlig design av produkten, som tillåter rationell återvinning. De tekniska aspekterna är naturligtvis avgörande för ett fungerande spårbarhetssystem, men de bör styras av hur systemet designas i övrigt. Det råder heller ingen generell brist på systemutvecklare eller teknikleverantörer med kompetens att tillhandahålla spårbarhetssystem.

Inför etableringen av ett (eller flera) spårbarhetssystem för ökad cirkularitet av kritiska råmaterial rekommenderas:

- Identifiera de viktigaste kritiska råmaterialen ur ett svenskt perspektiv. Den här studien kan lämpligen ligga till grund för en sådan prioritering. Samtidigt kan prioriteringarna komma att skilja sig åt beroende på vilket perspektiv initiativtagaren har (enskilt företag, bransch, samhällssektor, nation, globalt).
- Genomför en detaljerad aktörsanalys. En tillräckligt heltäckande medverkan från hela värde-/försörjningskedjan i kombination med en tillräckligt hög tillit mellan aktörerna är en kritisk framgångsfaktor. För att uppnå detta krävs en aktörsanalys som bland annat kartlägger vilka aktörer som ingår i den aktuella värde-/försörjningskedjan. Den här studien listar ett antal nyckelaktörer bland återvinnare, men har inte haft ambitionen att kartlägga fler steg i råmaterialens värde-/försörjningskedjor.
- Genomför en styrmedelsanalys. Ett spårbarhetssystem kommer att vara enklare eller svårare att ansluta sig till av olika skäl för olika aktörer. Det kommer också att underlätta uppföljning av de datatyper som spåras och, sannolikt, göra det relativt sett svårare att följa upp andra datatyper. Beroende på avgränsningarna kan det också gynna vissa flöden framför andra.

Framtida kartläggningar skulle underlättas av förfinad avfallsrapportering och intervjuer med nyckelaktörer

Klassificeringarna för i första hand avfallsrapporteringen men även export- och importdata är i dagsläget inte gjorda för att data på de kritiska materialen ska kunna tas fram på ett effektivt sätt. Den här studien har därför krävt att materialersammansättningen för olika produkter har skattats utifrån uppgifter i olika rapporter och publicerad litteratur. Ibland har det även krävts egna, mer eller mindre osäkra antaganden.

Erfarenheten från det här projektet har resulterat i ett förslag på en metod för framtida kartläggningar. Metoden bygger på en kombinerad kartläggning av konsumtion av väsentliga produkter och kunskapssammanställning över förväntad livslängd och materialsammansättning av produkterna. En framtida kartläggning föreslås också inkludera uppgifter om insamling, materialbehandling och återvinning för att få en komplett bild av vart de sekundära flödena tar vägen.

Inför kommande kartläggningar av sekundära flöden av kritiska råmaterial rekommenderas intervjuer med nyckelaktörer. De förväntas kunna tillföra relevant information om såväl flöden, återvinningstekniker och återvinningspotential som förutsättningar för en förfinad avfallsrapportering. Ett förbättrat kunskapsunderlag om dessa sekundära flöden bedöms kunna vara värdefullt också för kommersiella aktörer. Detta är viktigt inför beslut om till exempel investering i återvinning och återanvändning och för att identifiera eller tydliggöra konkurrens om specifika material för olika tillämpningar.

Spårbarhetssystem skulle potentiellt kunna ge ett stort bidrag för datainsamling beroende på vilken data som spåras, hur heltäckande värde-/försörjningskedja som inkluderas och om data görs tillgänglig. Det här knyter också an till frågan om vilken relevant data som olika verksamhetsutövare samlar in redan idag utöver vad som rapporteras vilket ytterligare understryker värdet av intervjuer som kompletterande datainsamlingsmetod för framtida kartläggningar.

Referenser

Agrawal, A., Pathak, P., Mishra, D. & Sahu, K.K., 2010. Recovery of metal values from spent nickel-cadmium rechargeable batteries by solvent extraction route. Proceedings of the XI International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2010). https://eprints.nmlindia.org/4109/1/163.pdf

Arc Metal, 2021. https://arcmetal.se/ Information om företaget. Sidan har besökts flera gånger under slutet av 2021

Arvaniditis, N., 2019. Circular economy is about resource efficiency, not "only" recycling. http://iapgeoethics.blogspot.com/2019/01/circular-economy-is-about-resource.html. 2019-01-09.

Avfall Sverige, 2016. Vad slänger hushållen i soppåsen? Rapport 2016/28. https://www.avfallsverige.se/kunskapsbanken/rapporter/rapportera/article/vad-slanger-hushallen-i-soppasen/

BatteryLoop, 2021-12-10. BatteryLoop. A Step Towards Circular Energy Use. A world-leading circular charging solution. https://www.batteryloop.com/.

BIO by Deloitte 2015. Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials. Prepared for the European Commission, DG GROW.

Bergholt, M-L. (RISE), 2021. Personlig kommentar från Spårning och spårbarhet, ett rundabordssamtal arrangerat av Sustainability Circle, 2021-11-10.

Bil Sweden, 2021. Databas nyregistreringar. https://www.bilsweden.se/statistik/databas-nyregistreringar.

Bolagsfakta, 2021. https://www.bolagsfakta.se/. Olika företagsfakta om bland annat omsättning har inhämtats. Sidan har besökts flera gånger under slutet av 2021 och början av 2022.

Boliden, 2021a. Bolidens Års- och hållbarhetsredovisning 2020. https://www.boliden.com/sv/investerare/rapporter-och-presentationer/arsredovisningar

Boliden, 2021b. https://www.boliden.com/sv/verksamhet/produkter/sakerhetsdatablad En samling av säkerhetsdatablad. Sidan har besökts flera gånger under slutet av 2021

Boliden, 2021c. https://www.boliden.com/ Bolidens hemsida, beskriver företaget och flera av deras metaller. Sidan har besökts flera gånger under slutet av 2021

Carlsson, R. (RISE), 2021. Personlig kommentar från Spårning och spårbarhet, ett rundabordssamtal arrangerat av Sustainability Circle, 2021-11-10.

Circulor, 2021. What the EU Battery Regulation tells us about the Battery Passport. https://www.circulor.com/battery-passport.

CES, 2020. The lithium-ion battery life cycle report 2021. Circular Energy Storage. https://www.circularenergystorage-online.com

CES, 2021. Circular Energy Storage Online the lithium-ion battery lifecycle data platform. https://www.circularenergystorage-online.com

Chen, W.-S., Chung, Y.-F. & Tien, K-W., 2020. Recovery of Gallium and Indium from Waste Light Emitting Diodes. Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 29(1), 81-88. DOI 10.7844/kirr.2020.29.1.81

Ciacci, L., Vassura, I., Cao, Z., Liu, G. & Passarini, F., 2019. Recovering the "new twin": Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. Resources, Conservation and Recycling, 142, 143–152, ISSN 0921-3449, DOI 10.1016/j.resconrec.2018.11.024.

Committee on Sustainability Assessment, 2019. Three Guidelines to Reveal What's Hiding in Your Supply Chain. https://thecosa.org/three-guidelines-to-reveal-whats-hiding-in-your-supply-chain/.

CORDIS, 2017. Recovery of Rare Earth Elements from magnetic waste in the WEEE recycling industry and tailings from the iron ore industry. https://cordis.europa.eu/project/id/603564/reporting. 2017-08-16.

Dai et al., 2018. Update of Bill-of-Materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model. https://greet.es.anl.gov/publication-update_bom_cm

DI, 2021. Northvolts återvinningsfabrik ska bli mångdubbelt större än planerat. https://www.di.se/hallbart-naringsliv/northvolts-atervinningsfabrik-ska-bli-mangdubbelt-storre-an-planerat/

EasyMining, 2021. https://www.easymining.se/ EasyMinings hemsida, beskriver företaget, deras tekniker och projekt som de är involverade i. Sidan besöktes i slutet av 2021

ECOS, 2021. Setting 'green' rules for a booming market – Pros and cons of the EU Battery Regulation proposal. https://ecostandard.org/news_events/setting-green-rules-for-a-booming-market-pros-and-cons-of-the-eu-battery-regulation-proposal/.

El-kretsen, 2019. Från återvinnare till råvaruleverantör – plast och elektronik. Hållbarhetsredovisning 2019. http://www.el-kretsen.se/sites/el-kretsen_se/files/media/Dokument/H%C3%A5llbarhetsrapport_webb_sve.pdf.

Energimyndigheten, 2016. Bättre förutsättningar för solceller på villataket. https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2016/battre-forutsattningar-for-solceller-pa-villataket. 2016-07-13.

Energimyndigheten, 2020. Beviljade projekt i utlysningen framtidens solel, vindkraft och elnät för en hållbar klimatomställning. http://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2020/beviljade-projekt-solel-vindel-och-elnat-2019.pdf

Energimyndigheten, 2021a. Förslag till nationell strategi för fossilfri vätgas. https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/forslag-till-nationell-strategi-for-fossilfri-vatgas/.

Energimyndigheten, 2021b. Scenarier över Sveriges energisystem 2020. https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=185971.

Energimyndigheten, 2021c. Vindkraftsstatistik https://www.energimyndigheten.se/statistik/den-officiella-statistiken/statistikprodukter/vindkraftsstatistik/ Senaste publicering: 2021-04-21.

Energimyndigheten, 2021d. Kortsiktsprognos sommar 2021. https://www.energimyndigheten.se/statistik/prognoser-och-scenarier/.

Engineering News, 2014. Swedish solar energy expert Midsummer and Chalmers University of Technology develops a unique process to recycle rare metals. https://www.engineeringnews.co.za/article/swedish-solar-energy-expert-midsummer-and-chalmers-university-of-technology-develops-a-unique-process-to-recycle-rare-metals-2014-02-19/

European Commission 2020a. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study. ISBN 978-92-76-15337-5. DOI 10.2873/865242.

European Commission, 2020b. COM(2020) 474 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN. 2020-09-03.

European Commission 2020c. Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Factsheets on Critical Raw Materials. ISBN 978-92-76-21053-5. DOI 10.2873/92480.

European Commission, 2020d. Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Factsheets on Non-critical Raw Materials. ISBN 978-92-76-21052-8. DOI 10.2873/867993.

European Commission, 2020e. Green Deal: Sustainable batteries for a circular and climate neutral economy. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_2312.

European Commission, 2020f. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonized energy system. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119941

Fransén, M. (Chalmers tekniska högskola), 2021. Personlig kommentar från Spårning och spårbarhet, ett rundabordssamtal arrangerat av Sustainability Circle, 2021-11-10.

Fråne, A., Anderson, S., Andersson, C., Boberg, N., Dahlbom, M., Miliute-Plepiene, J., Unsbo, H., Villner, M., George, M., 2022 (förväntad publikation). Kartläggning av plastflöden i Sverige. Med avseende på råvara, produkter och avfall.

Gröna Bilister, 2021. 20/4: Banta bilen! Svenska personbilars vikt ökar i accelererande takt. http://www.gronabilister.se/arkiv/pressmeddelanden-2021/banta-bilen-svenska-personbilars-vikt-okar-i-accelererande-takt.

Gustafsson, A., 2014. Recycling of CIGS solar cell waste materials. Doktorsavhandling vid Chalmers tekniska högskola. ISBN 978-91-7597-080-6 https://research.chalmers.se/en/publication/203661

Göteborg Energi, 2021. Pressmeddelande: Fyra olika projekt vinner Göteborg Energis hållbarhetsstipendium Tänk:Om 2021. https://www.mynewsdesk.com/se/goteborg_energi/pressreleases/pressmeddelande-fyra-olika-projekt-vinner-goeteborg-energis-haallbarhetsstipendium-taenk-om-2021-3146062. 2021-11-23.

Hemmelberg, S. & Hanna, J., 2021. Product and material traceability from managerial perspective. Stockholm Business School. Master's Degree Thesis in Management.

IEA, 2020. Global hydrogen demand by sector in the Sustainable Development Scenario, 2019-2070. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-sustainable-development-scenario-2019-2070, 2021-11-10.

Indium Corporation, 2008. The Use of Indium Chemicals in Alkaline Battery Manufacturing. https://www.indium.com/technical-documents/download/840/.

International Energy Agency 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report.

International Energy Agency 2021a. Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector.

IVL, 2021. TraceMet Report: Outlook. https://www.ivl.se/download/18.5bcd43b91781d2f501cc59/1616072443945/TraceMet%20WP2%20Outlook.pdf.

Karim, R. (Luleå Tekniska Universitet), 2021. Personlig kommentar från Spårning och spårbarhet, ett rundabordssamtal arrangerat av Sustainability Circle, 2021-11-10.

Kungliga ingenjörsvetenskapsakademien, 2020. Så når Sverige klimatmålen, Syntesrapport för IVA-projektet Vägval för Klimatet. https://www.iva.se/globalassets/bilder/projekt/vagval-klimat/iva-vagval-for-klimatet-syntesrapport.pdf

Källström, A (Sustainability Circle), 2021. Personlig kommentar från Spårning och spårbarhet, ett rundabordssamtal arrangerat av Sustainability Circle, 2021-11-10.

Larsson, K., Ekberg, C., Ødegaard-Jensen, A., 2013. Dissolution and characterization of HEV NiMH batteries. Waste Management 33, 689–698. DOI 10.1016/j.wasman.2012.06.001

Liu T & Qiu K., 2018 Removing antimony from waste lead storage batteries alloy by vacuum displacement reaction technology. Journal of Hazardous Materials, 347, 334–340. DOI 10.1016/j.jhazmat.2018.01.017.

Ljunggren M. S. & Ingemarsdotter E., 2014. Användning och återvinning av potentiellt kritiska material, Kunskapsöversikt. .

LKAB, 2019. LKAB investerar i pilotanläggning för fosfor och sällsynta jordartsmetaller. https://www.lkab.com/sv/nyhetsrum/pressmeddelanden/lkab-investerar-i-pilotanlaggning-for-fosfor-och-sallsynta-jordartsmetaller/. 2019-02-20.

LKAB, 2021. LKAB:s prospekteringsresultat bekräftar potential för produktion av fosformineralgödsel och sällsynta jordartsmetaller. https://www.lkab.com/sv/nyhetsrum/pressmeddelanden/lkabs-prospekteringsresultat-bekraftar-potential-for-produktion-av-fosformineralgodsel-och-sallsynta-jordartsmetaller/. 2021-03-31.

London Metal Exchange, 2019. LME responsible sourcing. https://www.lme.com/-/media/Files/Company/Responsibility/Responsible-sourcing/LME-responsible-sourcing-October-2019.pdf.

Mat4Green Tech, 2021. http://www.mat4greentech.com/ Mat4Green Techs hemsida, beskriver företaget och de forskningsprojekt som de är eller har varit involverade i. Sidan besöktes i slutet av 2021

Material Economics, 2020. Preserving Value in EU Industrial Materials, A value perspective on the use of steel, plastics, and aluminium.

Miljöbarometern 2030, 2020. Indikatorer för fossiloberoende transporter år 2030. Antal sålda cyklar och elcyklar. https://2030.miljobarometern.se/nationella-indikatorer/bilen/antal-salda-cyklar-och-elcyklar-b1l/. 2020-10-09.

Naturvårdsverket, 2021. Ett utdrag av importerad och exporterad mängd elektronikavfall för perioden 2010–2019, uppdelat på rapporterad(e) avfallskod(er) och land. Efter personlig kontakt med Naturvårdsverket.

Northvolt, 2021a. Northvolt produces first fully recycled battery cell – looks towards establishing 125,000 ton/year giga recycling plant. https://northvolt.com/articles/recycled-battery/. 2021-11-12.

Northvolt, 2021b. Northvolt partners with Swedish cleantech startup to upcycle 200,000 tons of salt per year. https://northvolt.com/articles/cinis/. 2021-10-18.

Ny Teknik, 2021. Sju mineral blir kritiska för vätgasboomen. https://www.nyteknik.se/premium/sju-mineral-blir-kritiska-for-vatgasboomen-7017119#7017198

Ovako, 2019. Environmental product declaration in accordance with ISO 14025 for: Hot-rolled bar steel product in Imatra, Ovako. Version 2019-03-20. https://www.ovako.com/globalassets/downloads/sustainability/epd-imatra.pdf

Ovako, 2020a. Environmental product declaration in accordance with ISO 14025 for: Hot-rolled bar steel product in Hofors, Ovako. Version 2020-10-28. https://www.ovako.com/globalassets/downloads/sustainability/epd-hofors.pdf

Ovako, 2020b. Environmental product declaration in accordance with ISO 14025 for: Hot-rolled bar steel product in Smedjebacken & Boxholm, Ovako. Version 2020-10-28. https://www.ovako.com/globalassets/downloads/sustainability/epd-smedjebacken-and-boxholm.pdf.

Ovako, 2021a. Sustainability report 2020. https://www.ovako.com/globalassets/downloads/sustainability/ovako-2020-sustainability-report.pdf

Ovako, 2021b. Statement on recycled content and recyclability. https://www.ovako.com/globalassets/downloads/sustainability/statement-recycled-content-ovako-20210621.pdf

Näringsdepartementet, 2021. Uppdrag att öka möjligheterna till hållbar utvinning och återvinning av mineral och metall från sekundära resurser. Regeringsbeslut N2021/01038, 2021-03-24.

Patil, A., Tarik, M., Struis, R. & Ludwig, C., 2021. Exploiting end-of-life lamps fluorescent powder e-waste as a secondary resource for critical rare earth metals. Resources, Conservation and Recycling, 164,105153, ISSN 0921-3449, DOI 10.1016/j.resconrec.2020.105153.

Plastcycle, 2022. About. https://plastcycle.nilu.no/en/about/. 2022-02-09.

Power Circle, 2018. Elbilsläget 2018. https://infogram.com/elbilslaget-2018-1h1749rjvkrq4zj?live

Power Circle, 2019. Elbilsläget 2018, Prognos elbilsutvecklingen 2019-2045. https://powercircle.org/wp-content/uploads/2019/01/Prognos-och-statistik-elektrifiering-transportsektorn1.pdf

ProSUM, 2022. About the project. ProSUM – Prospecting Secondary raw materials from the Urban Mine and Mining waste. http://www.prosumproject.eu/about-project. 2022-02-09.

reBuy, 2022. Mobile Phone. E-Waste Index. https://www.rebuy.de/s/mobile-ewaste-index-en. 2022-02-09.

Regeringskansliet, 2021. En taxonomi för hållbara investeringar. https://www.regeringen.se/regeringens-politik/finansmarknad/taxonomi-ska-gora-det-enklare-att-identifiera-och-jamfora-miljomassigt-hallbara-investeringar/.

RISE, 2020. TraceMet Report: Technical Development. RISE Report 2020:95 ISBN 978-91 89167-80-3

Sandvik Coromant, 2021. https://www.sandvik.coromant.com/sv-se/pages/default.aspx Sandvik Coromants hemsida, beskriver företaget och hur

deras verktyg återvinns. Informationen hittades på flera delar av sidan genom deras sökfunktion. Sidan besöktes flera gånger under slutet av 2021 och början av 2022.

SMED, 2020. Kartläggning av materialflöden av småelektronik i Sverige. SMED Rapport, ISSN 1653-8102.

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020a. Behandlat avfall efter typ av behandling och avfallsslag. Vartannat år 2010 – 2018. PxWeb (scb.se) https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0305/MI0305T003/. (2020-06-15)

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020b. Uppkommet avfall efter egenskap, näringsgren SNI 2007 (inkl. hushåll) och avfallsslag. Vartannat år 2010 – 2018. PxWeb (scb.se). https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0305/MI0305T01C/. 2020-06-15.

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020c. Export av anmälningspliktigt avfall efter mottagarland, avfallsslag och behandlingstyp. År 2012 – 2018. PxWeb (scb.se). 2020-06-01.

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020d. Import av anmälningspliktigt avfall efter avsändarland, avfallsslag och behandlingstyp År 2012 - 2018. PxWeb (scb.se) https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0308/MI0308T06/. 2020-06-01.

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020e. Såld och insamlad mängd batterier efter batterityp. År 2010 – 2018. https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0309/MI0309T03/. 2020-06-01.

Statistiska centralbyrån (SCB), 2020f. Såld och insamlad mängd elutrustning efter typ av utrustning och produktkategori. År 2010 - 2018 https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0309/MI0309T01/. 2020-06-01.

Statistiska centralbyrån SCB, 2021a. Varuimport från samtliga länder efter varugrupp KN 2,4,6,8-nivå och handelspartner, sekretessrensad, ej bortfallsjusterat. År 1995 – 2020. https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__HA__HA0201__HA0201B/ImpTotalKNAr/. 2021-10-27.

Statistiska centralbyrån SCB, 2021b. Varuexport till samtliga länder efter varugrupp KN 2, 4, 6, 8-nivå och handelspartner, sekretessrensad, ej bortfallsjusterat. År 1995 – 2020. https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__HA__HA0201__HA0201B/ExpTotalKNAr/. 2021-10-27.

Statistiska centralbyrån SCB, 2021c. Industrins produktion efter varugrupp enligt KN och lönebearbetning. År 1996 – 2020.

https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__NV__NV0119/IVPKNLonAr/. 2021-06-30.

Stena Aluminium 2017. Cast alloys in aluminium – Aluminium production through recycling since 1949. https://www.stenaaluminium.com/siteassets/document/brochures/legeringsbroschyr_2017_en_lr.pdf

Stena Aluminium, 2022a. The aluminium loop. A cross-trade loop for sustainable businesses. https://www.stenaaluminium.com/insights/the-aluminium-loop/. 2022-02-09.

Stena Aluminium 2022b. Clear policies for the purchase of aluminium raw material for recycling. https://www.stenaaluminium.com/aluminium-raw-material/purchasing-policy-and-conditions/. 2022-02-09.

Stena Recycling Group (flera olika talare från olika organisationer), 2021. Future of battery recycling. Expertseminarium genomfört 2021-11-30. https://www.stenarecycling.se/information/framtidens-batteriatervinning/experterna-om-framtidens-batteriatervinning/.

Stena Recycling, 2022. Energimyndigheten ger stöd åt Stena Recyclings storinvestering i batteriåtervinning. https://www.stenarecycling.se/nyheter/energimyndigheten-ger-stod/

Sternbeck, J., Palm, A. & Kaj, L., 2002. Antimon i Sverige - användning, spridning och miljöpåverkan. IVL rapport B1473. https://www.ivl.se/webdav/files/Publikationer/B1473.pdf

Svemin, 2019. Traceability of sustainable metals – a blockchain-based solution. https://www.ivl.se/download/18.3caf9fbe174fee4974b25ec/1603289493500/Traceability%20of%20sustainable%20metals%20%20slutrapport%20f%C3%B6rstudie%20(002).pdf.

Svenskt Aluminium, 2022-03-29. Om Aluminium. https://www.svensktaluminium.se/om-aluminium/.

Sveriges riksdag, 2021. Ny EU-förordning om batterier. Fakta-PM om EU-förslag 2020/21:FPM65 : COM (2020) 798. https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/fakta-pm-om-eu-forslag/ny-eu-forordning-om-batterier_H806FPM65.

Swedish Lifecycle Centre, 2021. Samordning av livscykeldata för ökad spårbarhet & plaståtervinning. Rapport 2021:03.

Swerim, 2021-12-13. SenSoRe – Sensorer och sortering för innovativ återvinning. https://www.swerim.se/sensore.

Sysav, 2021-12-13. Siptex – textilsortering. https://www.sysav.se/om-oss/forskning-och-projekt/siptex/.

Tesfaye, F., Lindberg, D., Hamuyuni, J., Taskinen, P. & Hupa, L., 2017. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. Minerals Engineering, 111, 209–221. ISSN 0892-6875, DOI 10.1016/j.mineng.2017.06.018.

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

Trafikanalys 2020. Vägfordonsflottans utveckling till år 2030. https://www.trafa.se/globalassets/pm/2020/pm-2020_7-vagfordonflottans-utveckling-till-ar-2030.pdf

Trafikanalys, 2021. Fordon på väg, statistik för Fordon 2020. https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon

Tunsu, C., Ekberg, C. & Retegan, T., 2014. Characterization and leaching of real fluorescent lamp waste for the recovery of rare earth metals and mercury. Hydrometallurgy, 144–145, 91–98, ISSN 0304-386X, DOI 10.1016/j.hydromet.2014.01.019.

Umicore, 2021. https://www.umicore.com/ Umicores hemsida, beskriver företaget, metaller som de tillhandahåller, material som de återvinner och några av deras återvinningsprocesser. Sidan besöktes i slutet av 2021.

Umicore Autocat Sweden, 2021. Årsredovisning för Umicore Autocat Sweden AB 556427-8447 Räkenskapsåret 2020-01-01 – 2020-12-31. https://www.hitta.se/f%C3%B6retagsinformation/umicore+autocat+sweden+ab/5564278447

UN Global Compact, 2014. A Guide to Traceability – A Practical Approach to Advance Sustainability in Global Supply Chains. https://d306pr3pise04h.cloudfront.net/docs/issues_doc%2Fsupply_chain%2FTraceability%2FGuide_to_Traceability.pdf.

Urban Mine Platform, 2018. Urban Mine Platform. Websida. http://www.urbanmineplatform.eu

Veolia, 2022. https://www.veolia.se/ljuskallor-lysror-och-lagenergilampor Veolias egen beskrivning av hur ljuskällor återvinns. Sidan besöktes senast i februari 2022.

Vinnova, 2017. Industriell process för utvinning av sällsynta jordartsmetaller ur elektronikskrot – verifiering. https://www.vinnova.se/p/industriell-process-for-utvinning-av-sallsynta-jordartsmetaller-ur-elektronikskrot---verifiering/. 2017-05-08.

Virolainen, S., Paatero, E. & Ibana, D., 2011. Recovery of indium from LCD screens. Conference paper, 19th International Solvent Extraction Conference, 3-7 October, Santiago, Chile.

Wiecka, Z., Rzelewska-Piekut, M., Regel-Rosocka, M., 2022. Recovery of platinum group metals from spent automotive converters by leaching with organic and inorganic acids and extraction with quaternary phosphonium salts, Separation

and Purification Technology, 280, 119933, ISSN 1383-5866, DOI 10.1016/j.seppur.2021.119933.

Wolfram Bergbau und Hütten AG, 2021. https://www.wolfram.at/en/ Wolframs hemsida, där företaget och deras återvinningsprocess beskrivs.

World Bank Group 2020. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition.

Yang, J., 2015. Process Development for Extraction and Separation of In and Y from Discarded Flat Panel Displays. Doktorsavhandling vid Chalmers tekniska högskola. ISBN 978-91-7597-201-5 https://research.chalmers.se/publication/215987

Yang, Y.et al., 2017. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap A Critical Review. Journal of Sustainable Metallurgy, 3(1), s.122-149.

Zhou, J., Zhu, N., Liu, H., Wu, P., Zhang, X. & Zhong, Z., 2019. Recovery of gallium from waste light emitting diodes by oxalic acidic leaching. Resources, Conservation and Recycling, 146, 366–372, ISSN 0921-3449, DOI 10.1016/j.resconrec.2019.04.002.