

Metaller och deras betydelse för produkters klimatavtryck

Underlag till regeringsuppdrag om spårning och
märkning av metaller

2018/073

Dnr: 2018/073

Myndigheten för tillväxtpolitiska utvärderingar och analyser
Studentplan 3, 831 40 Östersund
Telefon: 010 447 44 00
Fax: 010 447 44 01
E-post: info@tillvaxtanalys.se
www.tillvaxtanalys.se

För ytterligare information kontakta: Tobias Persson
Telefon: 010-4474477
E-post: tobias.persson@tillvaxtanalys.se

1 Metaller och produkters klimatavtryck

Bas- och tillverkningsindustrin står för ungefär en tredjedel av världens växthusgasutsläpp.¹ Den viktigaste orsaken till dessa utsläpp är produktionen av metaller. Utvinning och förädling av metaller och mineral är även förknippat med flera andra hållbarhetsutmaningar. Inte minst gäller detta barnarbete, att handel med metaller finansierar väpnade konflikter samt att verksamheten kan leda till stora lokala miljöproblem. Samtidigt är tillgången till metaller en förutsättning för utvecklingen av vindkraft, solceller, elektrifierade fordon och kommunikationsteknologi, det vill säga teknologier som behövs i omställningen till hållbart samhälle. Detta innebär att omställningen till ett hållbarare samhälle kräver en övergång till mer hållbart producerade metaller och mineral.

Ett motiv för att spåra och märka metallers utsläpp av växthusgaser är att detta har betydelse för produkters klimatavtryck, det vill säga det har betydelse var och hur mineraler utvinns och processas. Genom att synliggöra hur mycket produkter bidrar till utsläpp av växthusgaser kan konsumenter och investerare göra medvetnare val.

Flera studier (Faria et al 2012, Hawkins et al 2012; Ellingsen et al, 2016) har visat att elmixen som används i processerna har en särskild betydelse för utsläppen av växthusgaser. De låga utsläppen från elproduktion i Sverige talar för en konkurrensfördel i processer som är beroende av el.

Att skapa ett märkningssystem innebär dock kostnader varför en central fråga är vilken betydelse en märkning skulle ha för utsläppen av växthusgaser. I denna analys kvantifierar vi därför effekten på utsläppen av växthusgaser för produktionen av litiumjonbatterier, elbilar och mobiltelefoner om de produceras med stål, koppar, aluminium och magnesium från olika konkurrerande anläggningar. Detta är bara grova beräkningar för att visa på de stora dragen. De ska därför användas med stor försiktighet. Alla värden ligger dock i närheten av andra analyser på området.

1.1 Metod – miljöavtryck "cradle to gate"

Denna analys bygger på inventeringar av växthusgasutsläppen från utvinning till färdig produkt (cradle to gate). Detta innebär att utsläpp som uppstår vid driften av en produkt inte beaktas. Vi beaktar således inte betydelsen av att gå över till lättviktsmaterial för att minska bränsleförbrukningen i fordon.

Analysen utgår från att det finns ett specifikt metallbehov för att producera ett litiumjonbatteri, en bil respektive en mobiltelefon. Vi använder sedan olika emissionsfaktorer (kg CO₂-ekvivalenter per kg bulkmetall) för att undersöka betydelsen av lokalisering av smältverk och andelen återvunnet material för dessa produkters totala växthusgasutsläpp från produktionen.

1.1.1 Metallbehov och emissionsfaktorer

Metallbehoven för produkterna och emissionsfaktorer för metaller bygger på existerande litteratur. IVL gjorde år 2017 på uppdrag av Energimyndigheten en genomgång av livscykelanalyser (LCA) för produktion av litiumjonbatterier (IVL, 2017). Från denna rapport används emissionsfaktorer för metaller med undantag för emissionsfaktorerna för

¹ IPCC (2014). Climate change: Mitigation of climate change.

stål, koppar, aluminium och magnesium. När det gäller emissionsfaktorer för dessa basmetaller används istället faktorer som representerar svenska förhållanden respektive höga globala värden (se kapitel 2).

Beräkningar för elbilen bygger på data för en Mercedes C 350 e (Daimler, 2015). Detta är en bensinbil med laddhybridsteknik (plug in) som har ett litiumjonbatteri på 6,2 kWh. Beräkningarna för mobiltelefon är baserade på materialdata som presenteras i Cucchiella et al. (2015).

2 Betydelsen av återvinning och lokaliseringen av smältverk

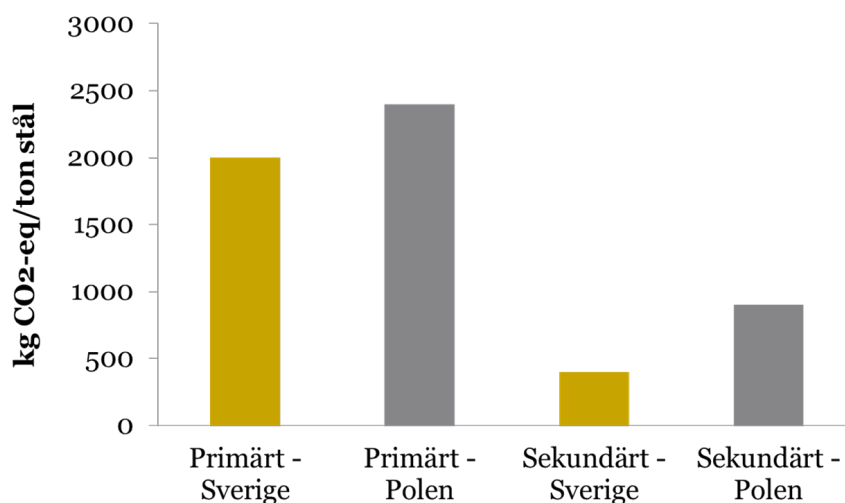
Många gånger är förädlingen av metaller från en malm energikrävande processer. Detta innebär att utsläppen av växthusgaser är beroende av var denna energi kommer ifrån, inte minst gäller detta elmixen. I detta kapitel lyfter vi fram betydelsen av elmixen samt vikten av att använda återvunna metaller.

2.1 Stålproduktion – sekundärt stål innebär redan låga utsläpp

Stål produceras från järnmalm genom processer där fossila bränslen används. Vanligast är masugnsbaserad ståltillverkning där kolbaserad koks används som reduktionsmedel (Energimyndigheten, 2017). SSAB:s stålproduktion bygger på masugnsteknik. Ett alternativ som vuxit senare år är stålproduktion genom direktreduktion där det är vanligt att använda naturgas. En metod för direktreduktion används i Sverige för att producera järnpulver med specifika egenskaper. Globalt är det dock vanligare att använda direktreduktion för att producera råstål. Sekundär stålproduktion från återvunnet stål är mindre energikrävande än primär. Eftersom elektrolys används blir utsläppen av växthusgaser beroende av elmixen. Återvunnet stål har ett högt ekonomiskt värde och är generellt konkurrenskraftigt med primärt producerat stål. Detta har gjort att stål är den metall med högst återvinningsgrad, ungefär 83 procent av allt stål återvinns i världen (Material Economics, 2018).

Att jämföra utsläppen av växthusgaser från stålproduktion är inte lätt eftersom det delvis beror på vilken stålqualität som tillverkas. I Sverige produceras stål med hög kvalitet som framförallt används inom fordonsindustrin. Detta gäller både primärt- och sekundärt stål. Den primära stålproduktionen ger upphov till omkring 2000 kg CO₂-ekvivalenter per ton producerat stål (se Figur 1) vilket är ungefär 20 procent lägre än i Polen (Byrchart-Korol, 2013). I jämförelse med återvunnet stål är det dock mycket. Det går att köpa miljödeklarerat återvunnet svenskt stål vars växthusgasutsläpp bara är en femtedel (Ovako, 2015). Skillnaden är dock mindre om man istället jämför med att återvunnet stål från Polen. Orsaken till detta är att den polska elproduktionen är mycket kolbaserad.

Figur 1. Utsläpp av växthusgaser från primär och sekundär stålproduktio



Primärt- och sekundärt stål Polen: D. Byrchart-Korol (2013) Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. *Journal of Cleaner Production*, vol 54, p. 235-243.

Primärt stål Sverige:

Sekundärt stål Sverige: Ovako - climate declaration of hot-rolled bar steel product

2.2 Koppar – stora men inte lika stora skillnader

Koppar (Cu) framställs från kopparkoncentrat (anrikad malm) och återvunnen metall i kopparsmältverk. Vid primär kopparproduktion används den mesta av energin från utvinningen till och med smältverket (Norgate & Jahanshahi, 2010). Hur mycket energi som behövs beror på malmkoncentrationen och varierar mellan 8 000 och 25 000 MWh per ton koppar (UNEP, 2013). Andelen elektricitet av detta varierar (Koppelaar & Koppelaar, 2016) men antas i denna analys att vara 50 procent. Detta innebär att utsläppen av växthusgaser från primär kopparproduktion i Polen är 11 000 kg CO₂-ekvivalenter per ton producerat koppar vilket kan jämföras med 2 800 kg CO₂-ekvivalenter per ton producerat koppar i Sverige.²

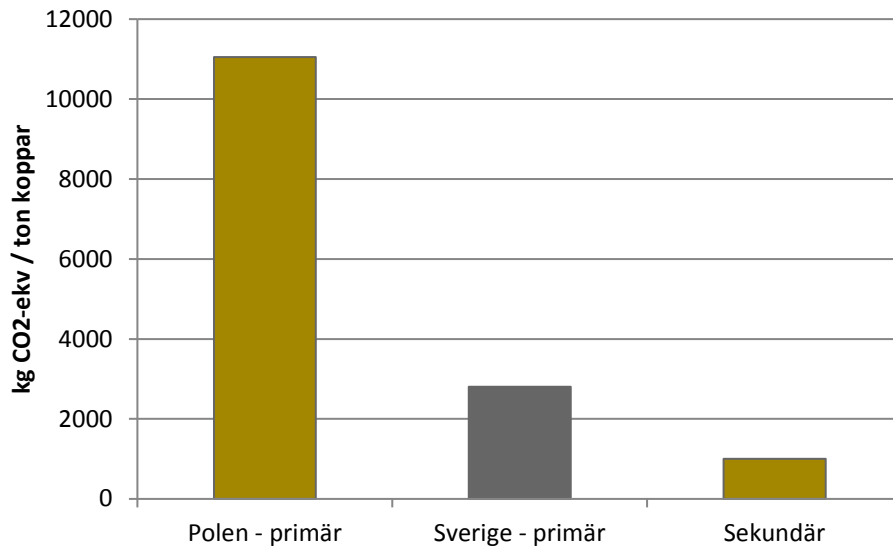
Sekundär kopparproduktion är betydligt energieffektivare och uppskattas kräva drygt 2 MWh per ton koppar (Elshkaki et al., 2016). Detta innebär att växthusgasutsläppen från sekundär kopparproduktion är betydligt lägre än för primär. Emissionsfaktorn ligger omkring 1 000 kg CO₂-ekvivalenter per ton producerat koppar. Den varierar dock något vilket framförallt beror på kvalitén på det återvunna materialet och vilken metallurgisk process som används (Ekman Nilsson et al., 2017).

I genomsnitt kommer 45 procent av världens produktion av koppar idag från återvunnen koppar. Andelen i Bolidens produktion är 60 procent. Denna andel kan dock förväntas öka i framtiden. Ungefär 90 procent av all koppar i fordon återvinns och liknande värden uppvisas för andra produkter. Många av dessa produkter har dock en lång livslängd, till exempel elnät och kablar i byggnader med en livslängd på 30-100 år.³

Figur 2. Utsläpp av växthusgaser från primär och sekundär kopparproduktion

² Under antagandet att det totala energibehovet är 16 500 MWh per ton koppar. Emissionsfaktorn för el är ungefär 50 gCO₂-ekvivalenter per kWh i Sverige och 1050 gCO₂-ekvivalenter per kWh i Polen.

³ <https://www.kupferinstitut.de/en/materials/system/recycling-copper.html>



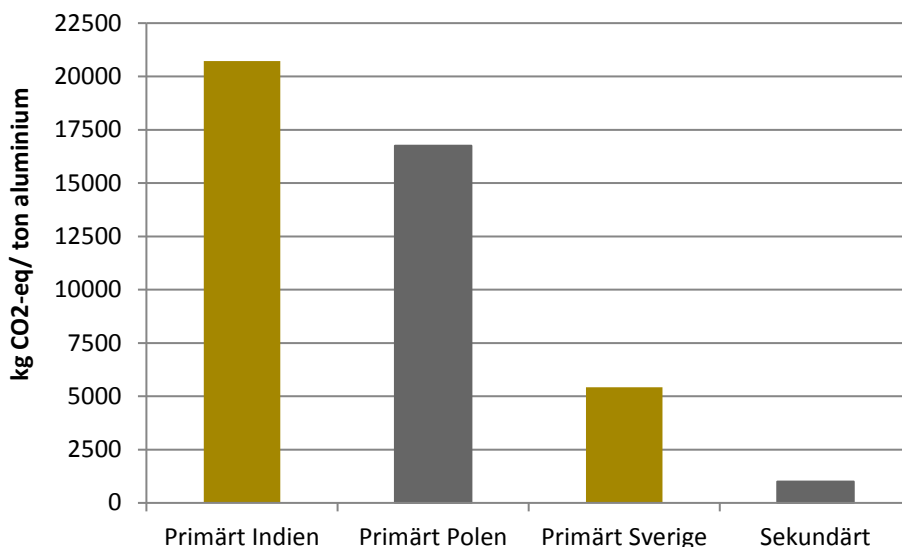
2.3 Aluminium – elproduktionen är viktig

Primär aluminiumproduktion (Al) från bauxit är elkrävande eftersom processen kräver elektrolys. Utöver elektricitet till elektrolys behövs energi för brytning av bauxit, produktionen av aluminiumoxid och götjutning. För att producera ett ton aluminium behövs ungefär 17 MWh energi (IAI, 2017) varav omkring två tredjedelar är elektricitet.

Det stora elberoendet för primär aluminiumproduktion innebär att utsläppen av växthusgaser blir beroende av elmixen. Indien får en emissionsfaktor på ungefär 21 000 kg CO₂-ekvivalenter per ton producerat aluminium vilket är 25 procent mer än i Polen eller knappt fyra gånger mer än i Sverige.

Sekundär aluminiumproduktion är mindre energiberöende. Att producera ett ton återvunnet aluminium kräver ungefär 3 MWh (Cui & Roven, 2010), det vill säga knappt 18 procent av den energi som behövs för att göra samma metall från bauxit. Av den energi som behövs är ungefär tio procent elektricitet. Detta innebär att utsläppen av växthusgaser från sekundär aluminiumproduktion inte är särskilt beroende av var det produceras. Utsläppen av växthusgaser är omkring 1 000 kg CO₂-ekvivalenter per ton producerat aluminium. Återvunnet aluminium har ett högt ekonomiskt värde och är generellt konkurrenskraftigt med primärt producerat aluminium. Detta har gjort att stål är den metall med högst återvinningsgrad, ungefär 77 procent av allt stål återvinns i världen (Material Economics, 2018). Till skillnad mot stål behövs fortfarande mycket primärt aluminium eftersom det inte finns lika mycket aluminium i samhället och att många aluminiumbaserade produkter har en lång livslängd. Det är därför vanligt att aluminium som säljs består av primärt aluminium med en liten andel återvunnen aluminium inblandat. Ett undantag är till exempel norska Hydro:s produkt 75R som består till 75 procent återvunnet aluminium.

Figur 3. Utsläpp av växthusgaser från primär och sekundär aluminiumproduktion



2.4 Magnesium – elproduktionen är viktig

Magnesium (Mg) har blivit ett allt vanligare material, inte minst för att minska vikten på fordon. Densiteten på magnesium är två tredjedelar av aluminium och en sjättedel av stål. Genom att ersätta dessa material med magnesium kan därför fordonsvikten minska och därmed bränsleförbrukningen.

Historiskt har användningen av magnesium varit begränsat eftersom metallen har en relativt hög produktionskostnad, delvis orsakat av den energikrävande processen. Primärproduktion av magnesium sker framförallt idag i Kina med en Pidgeon process där kol används som reduktionsmedel. För att producera ett kilogram magnesium behövs omkring dubbelt så mycket energi som för att producera ett kilogram aluminium eller fyra gånger så mycket energi som för att producera ett kilogram stål (Wulandari et al., 2010). Eftersom mycket av denna energi framförallt kommer från kol blir utsläppen av växthusgaser hög, omkring 26 ton CO₂-ekvivalenter per ton magnesium (Ehrenberger, 2013).

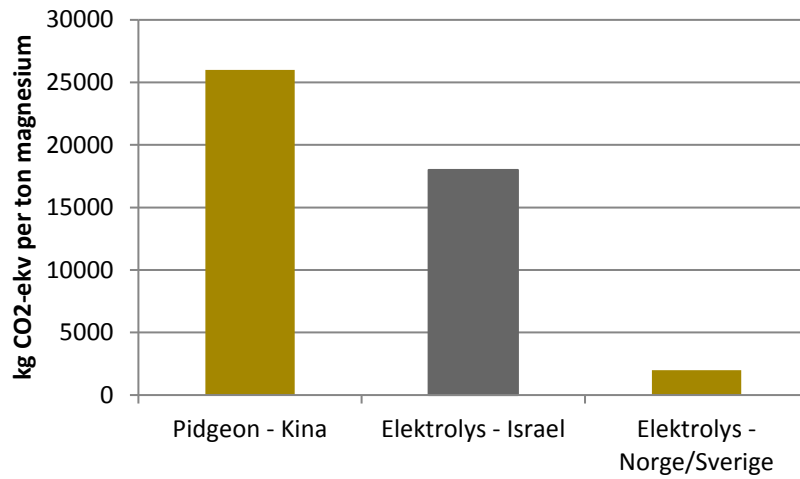
Ett alternativ till Pidgeon processen är elektrolys. Eftersom denna process är elberoende blir elmixen avgörande för utsläppen av växthusgaser. I Israel med en elmix bestående av grovt två tredjedelar naturgas och en tredjedel kol blir utsläppen av växthusgaser ungefär 18 ton CO₂-ekvivalenter per ton magnesium (Ehrenberger, 2013). I länder med en elmix som består av mer icke fossila bränslen kan denna siffra reduceras kraftigt. Om magnesium skulle produceras genom elektrolys i Sverige skulle emissionssiffran vara under två ton CO₂-ekvivalenter per ton magnesium. Statligt ägda forskningsfinansieringsbolaget Enova i Norge beviljade också 19,5 miljoner norska kronor i stöd till en pilotanläggning för energi- och klimateffektiv produktion av magnesium på Herøya. Målet är att bygga världens första koldioxidfria produktionsanläggning av magnesium.

En mycket liten andel, cirka sju procent, av världens magnesiumproduktion i världen kommer från återvunnen metall.⁴ En orsak till att denna andel är lägre än för andra

⁴ International Magnesium Association (2017). Magnesium recycling in the EU – Material flow analysis of magnesium (metal) in the EU and derivation of the recycling rate.

bulkmetaller ovan är att omkring 40 procent av allt magnesium används som legeringsmetall i aluminium. Detta gör det dyrare att återvinna.

Figur 4. Utsläpp av växthusgaser från produktion av magnesium



3 Slutprodukten – är det viktigt?

Som visats i kapitel 2 varierar utsläppen av växthusgaser betänkligt för bulkmetaller beroende hur och var de produceras. Frågan är dock hur betydande detta är för olika produkter.

3.1 Litiumjonbatteri – betydelsen av metaller

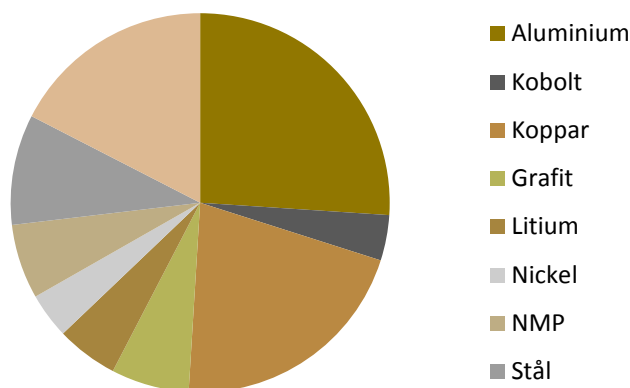
Produktionen av litiumjonbatterier förväntas de kommande åren växa med snabbt. En viktig del av denna utveckling är elektrifieringen av transportsektorn. I Parisdeklarationen om elektricitet och klimatförändringar antogs ett globalt mål om det ska finnas 100 miljoner elbilar år 2030 (UNFCCC, 2015). Efterfrågan på litiumjonbatterier förväntas inte bara drivas av elektrifieringen av fordon utan även av lagring av el från intermittent elproduktion och bärbar elektronik. Europeiska kommissionens forskningsinstitut (JRC, 2016) i Nederländerna gjorde år 2016 bedömningen att EU:s behov av kobolt skulle öka med åtta procent per år fram till 2030, grafit med 10 procent per år och litium med 11 procent per år.

3.1.1 Metallbehov och växthusgasutsläpp

Det finns idag några dominerande litiumjonbatterityper men utveckling av nya typer pågår. Figur 5 visar fördelningen mellan metaller i ett typiskt litiumjonbatteri för bilar. Ungefär två tredjedelar av massan är traditionella bulkmetaller i form av aluminium, koppar och stål. Bulkmetallernas utsläpp av växthusgaser kommer därför ha en betydelse för ett litiumjonbatteries klimatbelastning – frågan är dock hur mycket?

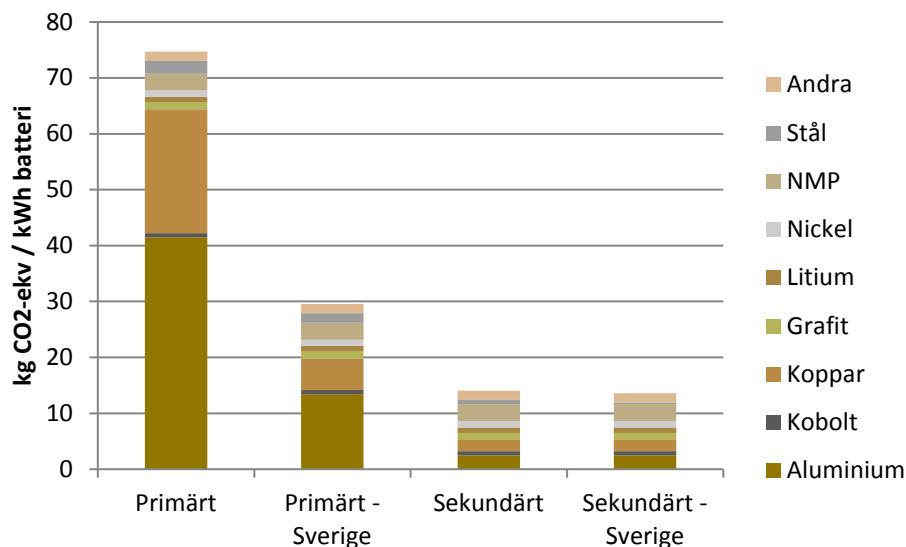
Figur 6 visar på hur utsläppen av växthusgaser varierar beroende på om ett batteri är producerad med primära metaller där fossil energi används, är producerade av primära metaller med en svensk elmix, sekundär (återvunna) metaller där fossil energi används respektive sekundära metaller med svensk elmix. Att använda primära bulkmetaller från Sverige och sekundära bulkmetaller kan utsläppen minska med omkring en tredjedel. I bästa fall skulle utsläppen kunna halveras om litiumjonbatterierna tillverkades av sekundära bulkmetaller med svensk elmix.

Figur 5. Fördelning av metaller i ett litiumjonbatteri (NMP – N-metylpyrrolidone)



Data från Ellingsen m.fl. 2014.

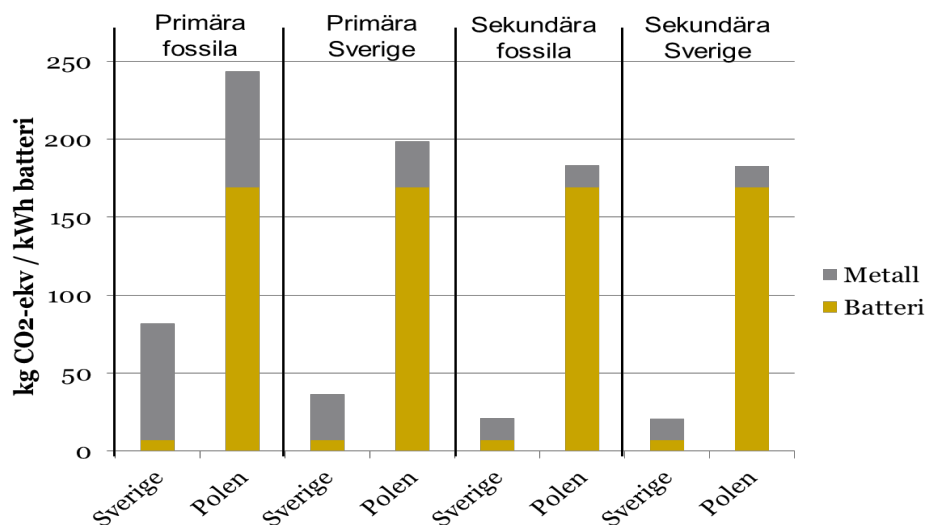
Figur 6. Utsläpp av växthusgaser från metaller i en kWh litiumjonbatteri



3.1.2 Produktionen av litiumjonbatteri är viktigare än metallerna

En övergång till metaller med låga växthusgasutsläpp kan ställas i relation till de utsläpp som uppstår i produktionen av litiumjonbatterier. Tillverkningen är en mycket elkrävande process. Detta innebär att elmixens utsläpp av växthusgaser vid batterifabriken har stor betydelse för ett litiumjonbatteris klimatbelastning. Figur 7 visar hur utsläppen varierar om batterifabriken finns i Sverige respektive Polen och bulkmetallerna är primära med fossil energi, primära med svensk elmix, sekundära med fossil energi eller sekundära med svensk elmix. Oavsett hur bulkmetallerna är producerade är den viktigaste faktorn var batterifabriken är placerad. Genom att placera fabriken i Sverige istället för Polen ger upphov till minst 50 procent lägre utsläpp av växthusgaser. För en batterifabrik som är lokaliserad i Sverige är det viktigt hur bulkmetallerna produceras för den totala klimatbelastningen av litiumjonbatteriet då detta utgör en större del av utsläppen.

Figur 7. Utsläpp av växthusgasutsläpp från metaller och produktion av litiumjonbatteri i Sverige respektive Polen



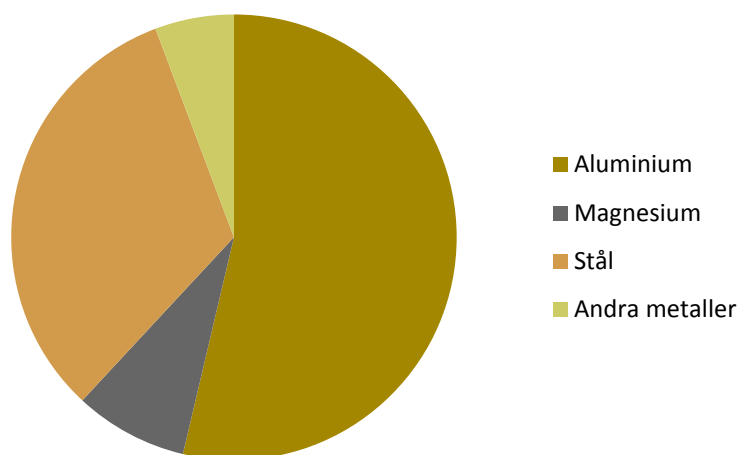
3.2 Bilar – betydelsen av metaller

Biltillverkare har senaste decenniet börja använda allt mer lättviktsmaterial istället för stål för att minska vikten på fordon och därmed bränsleförbrukningen. Det har varit en viktig åtgärd för att kunna klara av statliga krav på utsläpp av växthusgaser från driften, till exempel EU:s krav på utsläppsnormer för nya personbilar (förordning EG 443/2009).

3.2.1 Metallbehov och växthusgasutsläpp

Aluminium utgör om hälften av metallvikten av en bil idag medan stål utgör en tredjedel av vikten (se Figur 8). Utöver detta vikten av magnesium betydande. Detta innebär att bulkmetaller utgör omkring 90 procent av metallvikten av en modern bil.

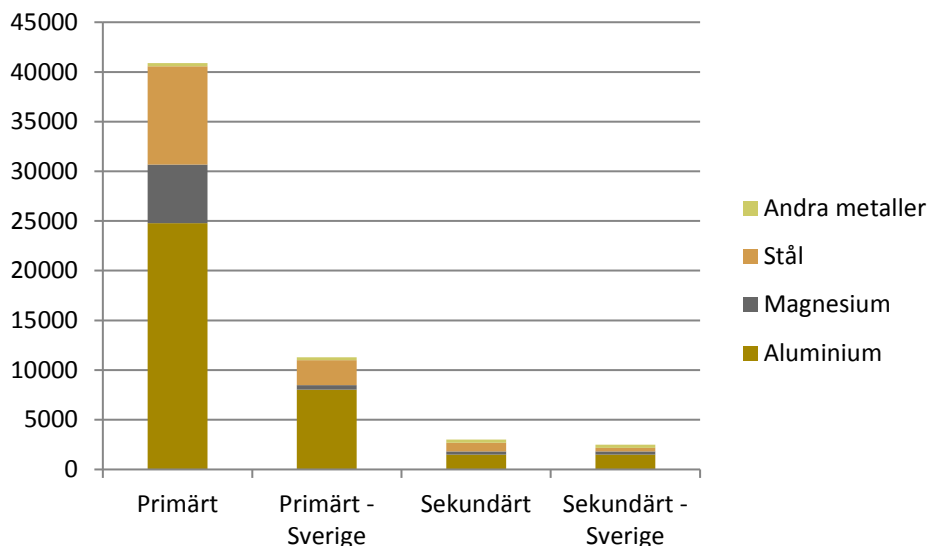
Figur 8. Metaller i en Mercedes C-klass



Den stora andelen bulkmetaller i en bil innebär att framställningen av dessa är viktig för bilproduktionens växthusgasutsläpp. Figur 9 visar hur utsläppen av växthusgaser varierar om bulkmetallerna är primärt producerade med fossil energi, primärt producerade med svensk elmix, sekundärt producerade med fossil energi och sekundärt producerade med svensk elmix. Om bilen tillverkas med primära metaller där fossil energi används är utsläppen

omkring 40 000 kg CO₂-ekvivalenter per bil. Nästan två tredjedelar kommer från aluminiumproduktionen. Om bulkmetallerna istället produceras i svenska smältverk blir utsläppen per bil bara en fjärdedel. Om bilen skulle tillverkas av sekundära bulkmetaller skulle utsläppen bli mindre än en tiondel.

Figur 9. Utsläpp av växthusgaser (kg CO₂-ekvivalenter) från metallerna i en Mercedes C-klass



3.2.2 Litiumjonbatteriet dominerar sällan utsläppen

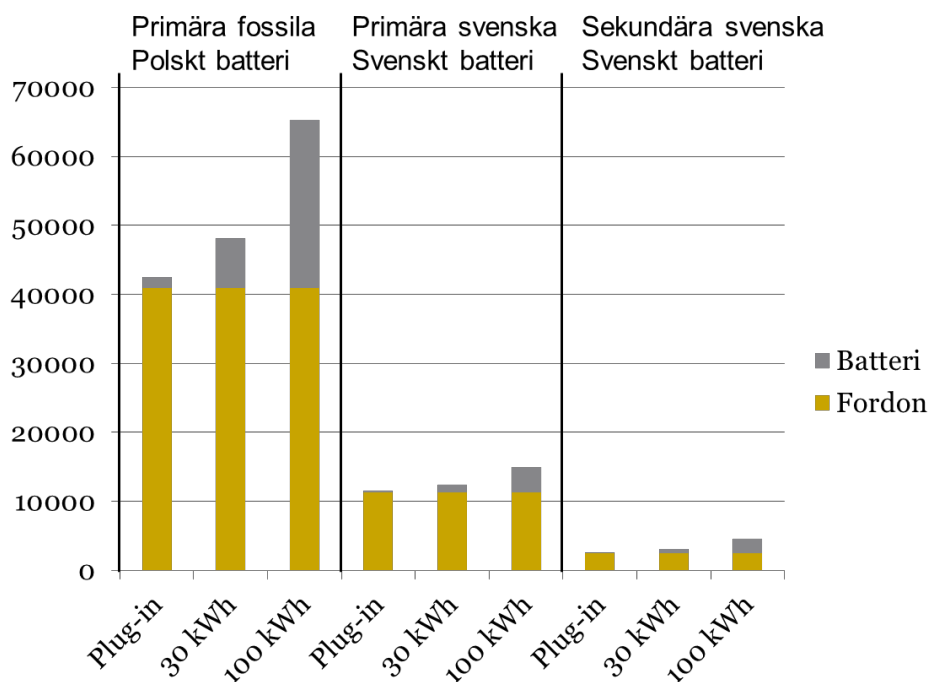
Betydelsen av produktionen av ett litiumjonbatteri för de totala växthusgasutsläppen av en bil beror mycket av batteriets effekt. En Tesla S har till exempel ett batteripaket som kan ge 100 kWh medan mindre sportiga elbilar har ett batteripaket på 30 kWh. En plug-in bil har normalt ett batteripaket på cirka 6 kWh.

Figur 10 visar hur de totala utsläppen som kommer från kaross respektive litiumjonbatteri i bilar med olika effekt på batteripaketet och där:

1. litiumjonbatteriet är tillverkat i Polen med primära bulkmetaller där fossil energi använts,
2. litiumjonbatteriet är tillverkat i Sverige med primära bulkmetaller där svensk elmix använts och
3. litiumjonbatteriet är tillverkat i Sverige med sekundära bulkmetaller där svensk elmix använts.

Det är tydligt att det har stor betydelse var litiumjonbatteriet tillverkas och hur stor effekt batteripaketet har. En Tesla som tillverkas med ett litiumjonbatteri från Polen och med primära metaller där fossil energi använts ger upphov till drygt fyra gånger mer växthusgasutsläpp än om batteriet och de primära metallerna tillverkas med svensk elmix. Skillnaden är drygt 14 gånger om sekundära metaller används och batteriet tillverkas i Sverige. Batteriets betydelse för bilkonstruktionens totala växthusgasutsläpp är betydligt mindre om batteripaketet är på 30 kWh. Detta är till exempel Nissan Leaf.

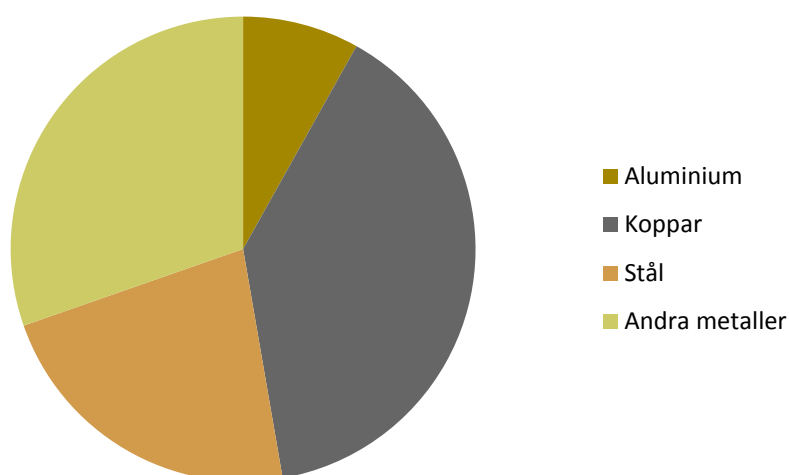
Figur 10. Utsläpp av växthusgaser (kg CO₂-ekvivalenter) från metaller och litiumjonbatteri i en bil



3.3 Mobiltelefoner – betydelsen av metaller

En stor skillnad på mycket elektronik produkter och fordon är att bulkmetallerna utgör en betydligt mindre del av vikten. En mobiltelefon består till omkring 50 procent plast och ungefär två tredjedelar av vilken utgörs av icke-metaller (Cucchiella mfl., 2015). En annan skillnad är att bulkmetaller utgör en mindre del av metallerna, ungefär två tredjedelar (Figur 11). Den största delen av detta är koppar.

Figur 11. Andelen olika metaller i en mobiltelefon

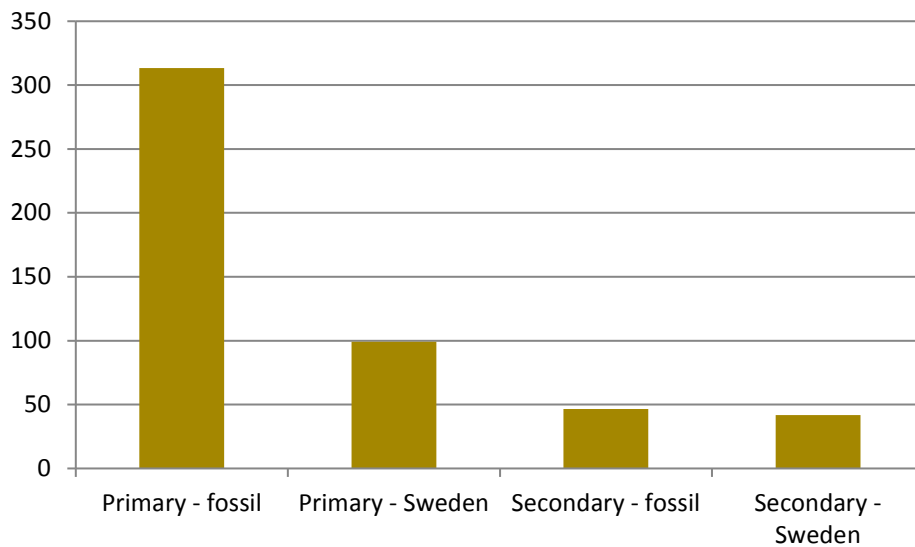


Data från Cucchiella mfl, 2015.

3.3.1 Utsläpp av växthusgaser från tillverkningen av en mobiltelefon

Figur 12 visar hur utsläppen av växthusgaser från tillverkningen av metaller till en mobiltelefon varierar om metallen är primärt producerad med fossil energi, primärt producerad med svensk elmix, sekundärt producerad med fossil energi och sekundärt producerad med svensk elmix. Genom att ersätta primära metaller från en produktion med fossil energi med en produktion med svensk elmix kan utsläppen minska till mindre än en tredjedel. Om sekundära bulkmetaller används kan utsläppen minska till en sjättedel.

Figur 12. Utsläpp av växthusgaser (gCO₂-ekvivalenter) från metaller i en mobiltelefon



För mobiltelefonen som helhet är detta emellertid inte särskilt betydande. Användningen av metall står nämligen bara för en bråkdel (under en procent) av växthusgasutsläppen vid produktionen av en mobiltelefon (Ercan et al., 2016). Den stora utsläppskällan är energibehovet (el) från tillverkningen av integrerade kretskort. Detta innebär att en stor minskning av utsläppen av växthusgaser skulle kunna skapas om kretskorten tillverkades med svensk elmix istället för fossil energi. Detta har dock inte kvantifierats i denna rapport.

4 Slutsatser

I en värld med mycket låga växthusgasutsläpp kommer det inte att spela någon roll var metaller produceras. I omställningen till denna värld har det dock stor betydelse. Framförallt beror detta på att metallproduktion kräver mycket elektricitet och elmixen varierar betänkligt i olika delar av världen. I Sverige är den ungefär 50 CO₂-ekvivalenter per kWh vilket jämföras med över 1 000 CO₂-ekvivalenter per kWh i Polen. En åtgärd för att minska utsläppen av växthusgaser från metallproduktionen är därför att lokalisera produktionen i regioner med stor tillgång till icke-fossil elproduktion. Att producera primärt aluminium, koppar och magnesium med svensk elmix istället för i länder med mycket elproduktion från kol innebär att växthusgasutsläppen minskar till mer än två tredjedelar.

Utsläppen av växthusgaser kan minska kraftigt genom att öka användningen av sekundära bulkmetaller. Användningen av sekundära metaller begränsas dock av dess renhet. Att skapa renare avfallsströmmar är därför en viktig åtgärd för att minska behovet av primära metaller.

Omställning till metaller med låga växthusgasutsläpp kan bland annat drivas av att konsumenter börjar efterfråga produkter med låga växthusgasutsläpp. Det är troligt att det dock bara kommer att vara en central drivkraft om metaller utgör en betydande del av produkters växthusgasutsläpp. Detta är till exempel faller för bilar och andra fordon, den största källan till växthusgaser i biltillverkningen idag är användningen av bulkmetaller. Om man däremot bara tittar till litiumjonbatteriet i en elbil så är metallerna i detta inte detta den största källan till utsläpp av växthusgaser. Den största källan är istället det stora elbehov som finns i tillverkningen av batterier. När det gäller elektronik är generellt inte heller metaller den viktigaste källan till utsläpp av växthusgaser. Ofta är det större utsläpp från plast- och glasproduktionen eftersom dessa utgör en större del av massan. Den största källan brukar dock ofta vara tillverkningen av integrerade kretskort, en process som är mycket elkrävande. Detta talar i sig för att både tillverkningen av litiumjonbatterier och integrerade kretskort ur klimatsynpunkt bör förläggas till länder med en stor tillgång till icke fossil elproduktion såsom Sverige.

5 Referenser

- Cherubini F. et al. (2008). LCA of magnesium production – technological overview and worldwide estimation of environmental burdens. *Resources, conservation and recycling*, vol. 52, p. 1093-1100.
- Cucchiella F. et al. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 51, p. 263-272.
- Cui J. & H.J. Roven (2010). Recycling of automotive aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20 (11), p. 2057-2063.
- Elshkaki A. et al. (2016). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change*, vol. 39, p. 305-315.
- Ellingsen L.A-W et al. (2016). The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental research letter*, vol. 11, p.
- Ehrenberger S. (2013). Life cycle assessment of magnesium components in vehicle construction. German Aerospace Centre e.V.
- Ekman Nilsson A. et al. (2017). A review of the carbon footprint of Cu and Zn production from primary and secondary sources. *Minerals*, Vol. 7(9), p. 168-180.
- Energimyndigheten (2017). Nulägesanalys - Underlag till regeringsuppdrag: Uppdrag att genomföra innovationsfrämjande insatser för att minska processindustrins utsläpp av växthusgaser. Rapport ER 2017:04.
- Ercan M. et al. (2016). Life cycle assessment of a smartphone. 4th International conference on ICT for sustainability.
- Faria R. et al (2012). A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energy Conversion and Management*, vol. 61 p. 19–30
- Hawkins T.R. et al (2012). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, p. 53–64
- IAI (2017). Life cycle inventory data and environmental metrics for the primary aluminium industry. International Aluminium Institute.
- JRC (2016). Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind power, photovoltaic and electric vehicles technologies, time frame: 2015–2030; EUR 28192 EN; doi:10.2790/08169
- Koppelaar R.H.E.M. & H. Koppelaar (2016). The ore grade and depth influence on copper energy inputs. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, Vol 1:11.
- Material economics (2018). The circular economy – a powerful force for climate mitigation.
- Norgate, T. & S. Jahanshahi (2010). Low grade ores – Smelt, leach or concentrate? *Mineral Engineering*, vol. 23, p. 65–73.

- Ovako (2015). Climate declaration of hot-rolled bar steel product. Approved by the International EPD system.
- UNEP,(2013). Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Van der Voet, E., Salminen, R., Eckelman, M., Mudd, G., Norgate, T., Hischier,
- UNFCCC (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change. *Paris declaration on electro-mobility and climate change & call for action*, 2015. Available at: <http://newsroom.unfccc.int/media/521376/paris-electro-mobility-declaration.pdf>
- Wulandari W. et al. (2010). Magnesium: current and alternative production routes. Chemeca: Australasian Conference on Chemical Engineering.