

Emissioner av växthusgaser och förbrukning av naturresurser vid tillverkning av personbilar med olika drivkällor - ur ett livscykelperspektiv

Bengt Steen, Duncan Kushnir, Maria Ljunggren Söderman, Anders Nordelöf, Björn Sandén,

Institutionen för Miljö och Energi

Avd. för Miljösystemanalys

Chalmers Tekniska Högskola

Göteborg 2013-04-14

Innehåll

Sammanfattning.....	4
Förkortningar.....	6
1. Inledning.....	6
1.1. Uppdraget.....	6
1.2. Underlaget.....	6
2. Metodik.....	6
2.1. Livscykelanalys.....	6
2.2. Litteraturstudier.....	7
2.3. Simulering med GREET-modellen.....	7
2.4. Validering.....	8
3. Resultat.....	8
3.1. Emission av växthusgaser från tillverkning av personbilar.....	8
3.1.1. Data som publicerats i teknisk och vetenskaplig litteratur.....	8
3.1.2. Simuleringar med GREET-modellen.....	14
3.1.3. Känslighetsanalys.....	15
3.2. Förbrukning av mineralresurser.....	20
3.3. Övriga emissioner.....	24
4. Diskussion.....	24
4.1. Validering, rimlighetsbedömning.....	24
4.2. Möjlighet att minska miljöbelastningen med hjälp av teknisk utveckling etc.....	25
5. Behov av ytterligare studier.....	26
6. Slutsatser.....	26
7. Referenser.....	27

Sammanfattning

Syftet med denna studie är att ta fram ett underlag som kan användas för bedömning av hur väl en omställning från konventionella bilar till fler elbilar, laddhybrider och bränslecells-bilar kan bidra till minskade växthusgasutsläpp i transportsektorn. Studien har avgränsats till fordonets livscykel, vilket innebär att bränslets livscykel, som för konventionella fordon normalt är det dominerande bidraget, ej analyseras.

Vi har genomfört en litteraturstudie av befintliga LCA-studier, gjort simuleringar med den publikt tillgängliga GREET-modellen, samt gjort egna överslagsberäkningar som underlag för en rimlighetsbedömning av publicerade resultat.

Resultatet från vår studie visar att elbilar har en något större miljöbelastning från fordonslivscykeln än konventionella bilar, men att nivåerna är starkt beroende på ett flertal faktorer. En viktig faktor är vilken återvinningsgrad som antas. De flesta studier som gjorts räknar med reducerad miljöbelastning från återvunnet material, när det används vid fordonstillverkningen. Där utgör det ungefär 30 % av fordonsvikten. Om man i stället räknar med återvinningsgraden vid skrotningssfasen, där den är uppemot 85 % får man betydligt lägre miljöbelastning. Vilket som är mest korrekt, beror på om materialmarknaden styrs av tillgången eller efterfrågan på återvunnet material.

Växthusgasemissionerna är dessutom beroende av bilens storlek, materialval, elbilarnas energi-effektivitet, prestanda, utrustningsnivå, livslängd, körsträcka, hur mycket fossila bränslen som används vid produktion av såväl el som ingående material samt teknikens mognadsgrad. Emissioner av växthusgaser vid produktion av de studerade fordonen är, liksom vid användning, ungefärligt proportionella mot fordonets vikt. Användningen av lättviktsmaterial minskar vikten med 30-40 % men emissionen av växthusgaser med endast cirka 10 % enligt GREET-modellen. Utrustningsnivån har stor betydelse för förbrukning av specialmetaller. Emissionerna per km är omvänt proportionella mot fordonets körsträcka under användningsfasen. Fossilbränsleanvändningen vid framställning av el har stor betydelse. Om alla material och fordon tillverkades med svensk el (eller mer generellt nästan koldioxidneutral el) blir växthusgasemissionerna från fordonslivscykeln bara hälften av de som uppstår om man använder el från kolkraft. Om övriga koldioxidutsläpp vid produktion av ingående material som stål och plast minskar i framtiden så reduceras utsläppen från bilens livscykel ytterligare. De siffror från VW, som nämns i uppdragstexten är onormalt hög och svåra att förklara. De representerar sannolikt ett extremfall med låg återvinning och hög fossilandel i den el som används.

Tekniken i laddhybrider, batteri och bränslecells-bilar, samt produktionen av drivlinans komponenter, är ännu relativt omogen och kan förväntas utvecklas. En stor potential finns för utveckling av lättare och effektivare komponenter, förbättrad systemverkningsgrad samt mer storskalig och energieffektiv tillverkning. Behovet av vissa specialmetaller till batterier och bränsleceller, såsom Li, Co, Ni, Sn och Pt, kommer att kräva en utveckling av effektivare återvinningsteknik om omställningen till laddhybrider och elbilar skall kunna ske i någon betydande omfattning.

Emissioner av VOC, SO_x, NO_x, PM₁₀ och PM_{2,5} följer i stort sett samma mönster som växthusgaserna i förhållandet mellan de olika fordonstyperna.

Förkortningar

BEV = Battery Electric Vehicle, Batteribil

EOL = End Of Life, Avfallsfasen

FCV = Fuel Cell Vehicle, Bränslecellsfordon

ICEV = Internal Combustion Engine Vehicle, Konventionell bil med förbränningsmotor

PHEV= PlugIn Hybride Electric Vehicle, Laddhybrid

1. Inledning

1.1. Uppdraget

Syftet med uppdraget är att ta fram ett underlag, som kan användas för bedömning av hur väl en omställning till fler elbilar/laddhybrider och bränslecellsbilar jämfört med konventionella fordon kan bidra till minskade växthusgasutsläpp i transportsektorn ur ett livscykelperspektiv. Uppdragstexten i sin helhet finns i appendix 1.

Livscykelanalysen jämför normalt olika produktsystem i förhållande till en s.k. funktionell enhet, som representerar produktens huvudsakliga nytta. I vårt fall är nyttan uträttat transportarbete, mätt i km. Vi jämför alltså miljöpåverkan per km. Men de flesta produkter har flera funktioner och det är inte säkert att behovet av transportarbete och val av fordonsmodell är det enda som avgör vilka utsläpp av växthusgaser som kommer att ske. Olika modeller kan i sin tur leda till olika sätt att använda fordonen. Ett fordon som är dyrt i inköp och billigt i drift, kan t.ex. stimulera till att man kör längre och behåller fordonet längre.

Effekter på användningen ligger utanför denna studie, men vi har försökt utforma studien för att ge underlag till sådana bedömningar. Vi har därför försökt kvantifiera hur parametrar såsom vikt, storlek och körsträcka påverkar utsläppen av växthusgaser från fordonets livscykel.

1.2. Underlaget

Underlaget till studien består av vetenskaplig och teknisk litteratur, en öppen LCA-modell för alternativa fordon, den s.k. GREET-modellen (Wang 2012), som ofta används i vetenskapliga studier, databasen Eco-invent (<http://www.ecoinvent.ch>) och CPM- databasen (<http://lifecyclecenter.se>).

2. Metodik

2.1. Livscykelanalys

Livscykelanalysens grundprinciper är helhet och transparens. Helhetens princip praktiseras främst i tekniksystemet (från vaggan till graven) men är även relativt väl utvecklad för miljösystemet (de flesta miljöpåverkanskategorier tas med). Transparensen uppnås genom en harmonisering av metodiken (ISO 14040 och ISO 14044, samt EUC/JRC ILCD handbook). Speciellt krävs i dessa

standarder att man skall vara tydlig på vad som är vetenskapliga kalkyler och vad som är subjektiva val. Systemgränser, parameterval och allokering är exempel på subjektiva val.

2.2. Litteraturstudier

Vi har använt tre olika strategier för att identifiera tidigare LCA-studier: web-sökningar, klassiska bibliotekssökningar och genomgång av andra litteratursammanställningar inom området. Det som främst har varit av intresse, förutom LCA-resultaten, är vad som analyserats, dvs. systemgränser, fordonstyper, modeller och miljöpåverkanstyp, hur analysen skett, dvs. typ av LCA, allokeringsmetoder mm., samt vem som gjort analysen. Den sista aspekten avser mest att ge underlag för bedömning av eventuellt partiskhet.

2.3. Simulering med GREET-modellen

GREET-modellen är en LCA modell för såväl bränslecykel som fordonscykel. Modellen har utvecklats av Argonne National Laboratory (Wang 2012) och består av två excelfiler, en för olika bränslecykler (Well to wheel) och en för olika fordonscykler. I bränslecykelfilen finns även olika sätt att producera och distribuera el modellerade, dels för användning till fordonsdrift, dels för stationär användning vid material och fordonstillverkning. I fordonscykelfilen finns modeller för bilar drivna med förbränningsmotorer (ICEV), för hybridbilar (HEV), för laddhybrider (PHEV), för batteridrivna bilar (BEV) och för bränslecellsbilar (FCV). Modelleringen har gjorts såväl för bilar med konventionella material som för lättviktsvarianter. Den modellversion som använts här heter 2.7.

LCA-data för de flesta material finns tydligt angivna. Sällsynta jordartsmetaller är behandlade aggregerat. Återvinningen är modellerad så att jungfruligt material, t.ex. stålplåt, får bära hela miljöbelastningen från gruva till bilfabrik, sammansättning till bil och återvinning till "skrotvara". Sekundärt material får bära miljöbelastningen från "skrotvara" till upparbetat nytt material, sammansättning till bil och återvinning till ny "skrotvara". Andelen primärt och sekundärt material är valbar för vissa material. Default-inställningen för dessa material framgår av tabell 1. Övriga material, t.ex. koppar, zink, magnesium och plaster är modellerade som jungfruliga material.

Tabell 1 Default-inställning av andelarna jungfruligt och återvunnet material i GREET-modellen v.2.7

	Jungfruligt material	Återvunnet material
Stål	73,6%	26,4%
Valsat aluminium	89,0%	11,0%
Gjutraluminium	15,0%	85,0%
Bly	27,0%	73,0%
Nickel	56,0%	44,0%

2.4. Validering

Resultatens rimlighet har bedömts genom att jämföra olika studier, genom granskning av GREET-modellen och genom överslagsberäkningar med hjälp av befintliga databaser och innehållsdeklarationer för personbilar.

3. Resultat

3.1. Emission av växthusgaser från tillverkning av personbilar

3.1.1. Data som publicerats i teknisk och vetenskaplig litteratur

Det finns en hel del studier av fordons livscykel ur ett "vaggan-till-graven-perspektiv". Det är emellertid svårt att få en helt klar bild över hur de utförts. Systemgränser är bara grovt beskrivna. Det är vanligt att man säger att EOL-fasen är medräknad, men inte hur. Man kan ofta bara ana sig till hur allokering av återvunnet material skett: t.ex. genom att Ecoinvent-databasen (www.ecoinvent.ch) använts eller genom att negativa staplar över sluppen miljöbelastning redovisas i EOL-fasen. Många räknar med full miljöbelastning vid användning av jungfruligt material och enbart belastning från upparbetning från skrot vid användning av återvunnet material, samt enbart transport, fragmentering och sortering i avfallsledet. Då blir det ingen kreditering av utsläpp om man materialåtervinner. Alternativet är att bara räkna på jungfruligt material i konstruktionen och kreditera återvinningen med skillnaden mellan jungfruligt och återvunnet. I det senare fallet blir miljöpåverkan mindre eftersom man återvinner upp till 85 %, medan bara cirka 30 % antas vara återvunnet material i tillverkningsfasen.

En annan oklarhet uppstår genom att man sällan anger vilken el som använts vid produktionen av olika material (dvs. hur mycket CO₂-ekvivalenter/kWh, som bildats). Även i de fall dataunderlaget gjorts tillgängligt, är det i praktiken omöjligt att spåra hur elen producerats. Vi har emellertid noterat ursprungslandet där studien gjorts. Det innebär inte att den elektricitet som använts vid tillverkningen av konstruktionsmaterialen är framställd i just det landet, men för större områden (USA, EU), är ett sådant antagande inte orimligt.

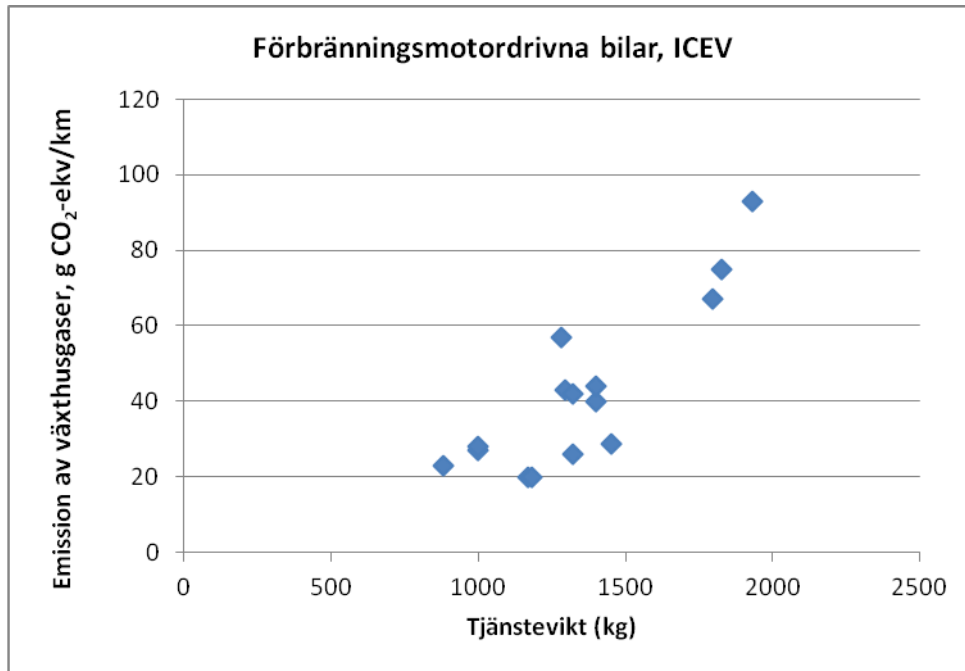
Bilarnas vikt har stor betydelse för de totala emissionerna vid tillverkningen. Ibland är de dåligt angivna. Man anger t.ex. att det är en mellanklassbil, eller bilmärket (ex. Toyota Corolla). Beroende på utrustningsnivån kan bilmodellens vikt variera med en hel del. Det finns vidare flera sätt att räkna fordonsvikten på, vilket ger en osäkerhet i materialvikten på en viss modell på i storleksordningen 100 kg. Viktsskillnaden mellan bensin och dieslbilar är bara några procent, så det är svårt att finna någon signifikant skillnad mellan emissionerna vid tillverkning av diesel och bensinbilar.

I figurerna 1 - 4 och i tabell 2 ges en översikt över redovisade växthusgasemissioner i de publikationer, som vi bedömt haft tillräcklig transparens.

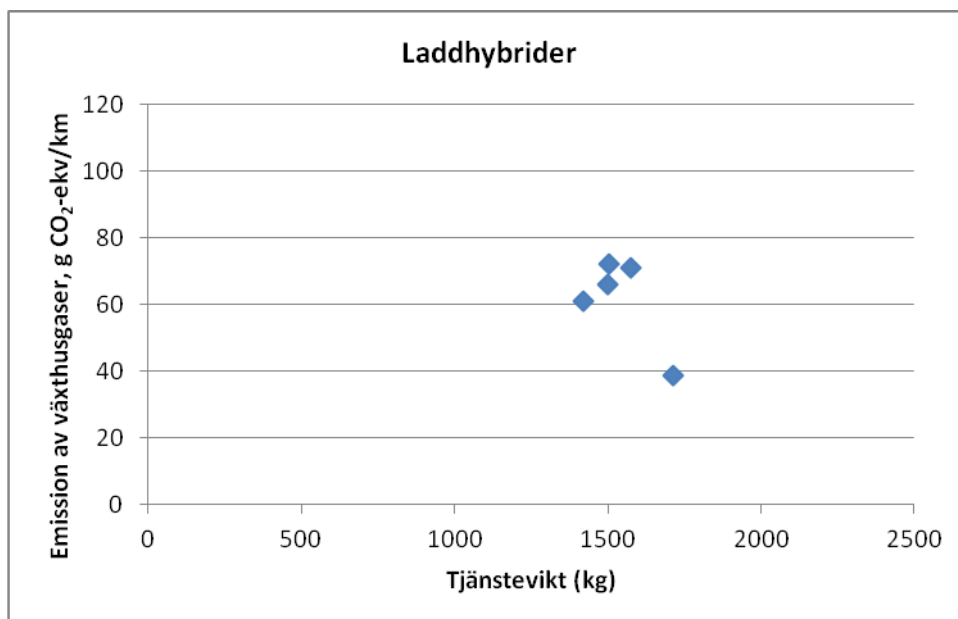
Data från konventionella bilar drivna med förbränningsmotorer (figur 1) är relativt samstämmiga. Anledningen är sannolikt att tekniken är väl känd och att LCA-analytikerna har haft god tid på sig att relatera sina studier till vad andra gör.

Resultaten för laddhybriderna är färre och ligger något högre. Det lägsta värdet beror sannolikt på att både bilen och batteriet antas återvinnas.

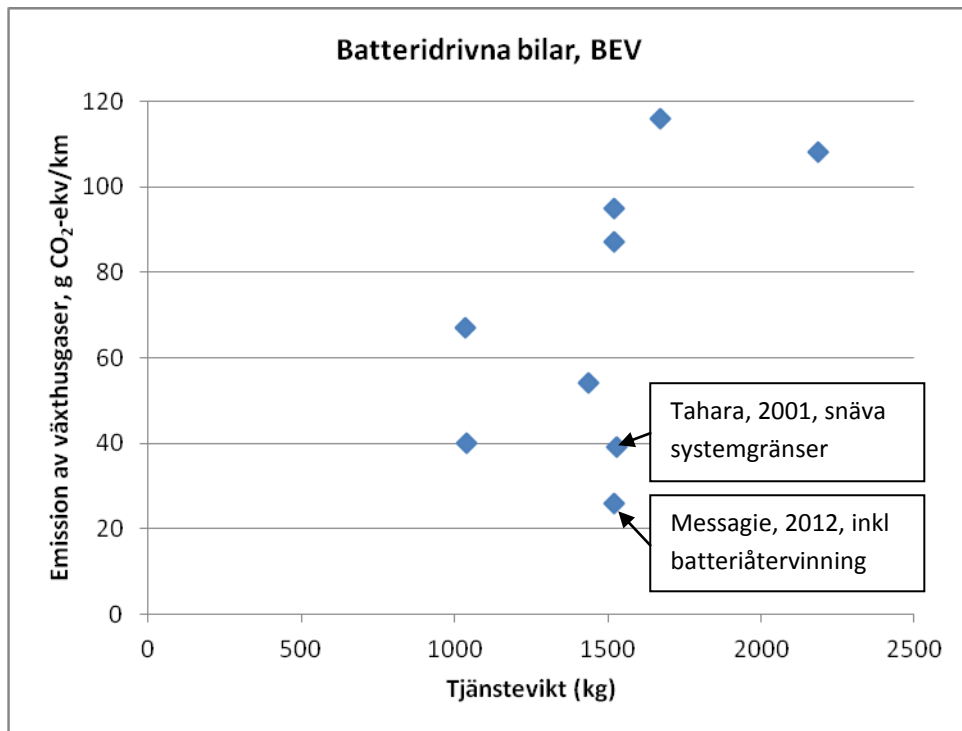
Batteriåtervinningen ger även utslag i resultaten för batteribilar (figur 3). Livscykelanalyser av bränslecellsbilar har bara påträffats i ett fall (Baptista 2009), i vilket GREET-modellen använts. Växthusgasemissionerna är relativt måttlig, bl.a. beroende på att elen antagits vara portugisisk, med en hög andel kärnkraft.



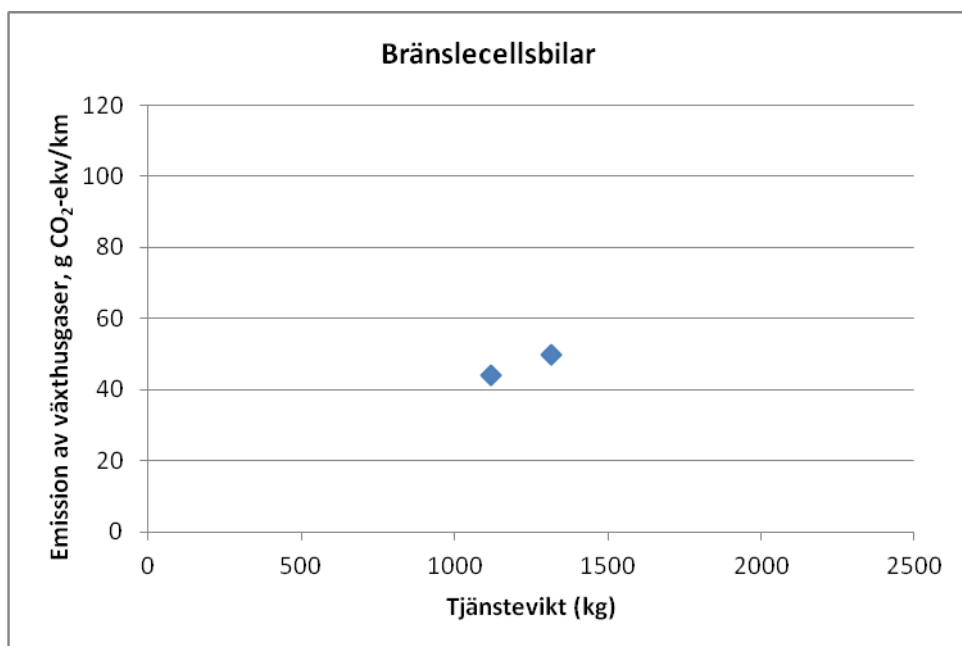
Figur 1 I litteraturen redovisade emissioner av växthusgaser som funktion av fordonsvikt för tillverkning av konventionella bilar drivna med förbränningsmotorer. Alla data är omräknade till 150000 km total körsträcka.



Figur 2 | litteraturen redovisade emissioner av växthusgaser som funktion av fordonsvikt för tillverkning av laddhybridbilar. Alla data är omräknade till 150000 km total körsträcka.



Figur 3 | litteraturen redovisade emissioner av växthusgaser som funktion av fordonsvikt för tillverkning av batteribilar. Alla data är omräknade till 150000 km total körsträcka.



Figur 4 I litteraturen redovisade emissioner av växthusgaser som funktion av fordonsvikt för tillverkning av bränslecells-bilar. I de fall som studerats användes portugiskisk el. Alla data är omräknade till 150000 km total körsträcka.

Tabell 2 Översikt över publicerade LCA-studier över fordonstillverkning i ett livscykelerspektiv. CO₂ data är omräknade till 150000 km total körsträcka.

Studie	Fordons-typ	Vikt (kg)	Studie-område	Återvinning	Utsläpp (g CO ₂ eq/km)	Anm.
Notter (2010)	BEV, VW Golf	1435	Tyskland	Inkl. EOL	54	LiMn2O4-katod
Tahara (2001)	BEV	1527	Japan	Ej spec.	39	
Held (2011)	BEV, mellanklass	1670	Tyskland	Ej inkluderat	116	Inkluderar underhåll av batteri
Held (2011)	BEV, mini	1037	Tyskland	Ej inkluderat	67	Inkluderar underhåll av batteri
Messagie (2012)	BEV, Nissan Leaf	1521	Belgien	Verklig Belgisk	26	Återvinning av batteri
Ma (2012)	BEV, Phoenix SUV	2186	Kalifornien	Ej inkluderat	108	Enbart CO ₂ , exkl. samman-sättning och demontering
Helmers (2010)	BEV, Smart	1040	Tysk		40	Omräknat till 150000 km, Exkl. återvinning
Hawkins (2013)	BEV, ungefär Nissan Leaf, LiFePO ₄ batteri	1521	Europa	84%, fordon, 0% batteri	95	41% av GWP från batteri, 8% från elmotor, 18% från generator & kylsystem
Hawkins (2013)	BEV, ungefär Nissan Leaf, LiNMC batteri	1521	Europa	84%, fordon, 0% batteri	87	35% av GWP från batteri, 7% från elmotor, 16% från generator & kylsystem
Baptista (2009)	FC-HEV	1388	Portugal	Inkl. EOL	48	
Baptista (2009)	FC-PHEV	1315	Portugal	Inkl. EOL	50	Baserat på GREET
Held (2011)	ICEV, Bensin	Mellan-klass	Tyskland	Ej inkluderat	40	
Held (2011)	ICEV, Bensin	Mini	Tyskland	Ej inkluderat	27	
Tahara (2001)	ICEV, bensin	1168	Japan	Ej spec.	20	
Hearron (2011)	ICEV, bensin, medeltyp	1451	USA	80%	28,6	Angivet som CO ₂ , ej som CO ₂ eq. GREET 2.7 använd
Held (2011)	ICEV, Diesel	Mellan-klass	Tyskland	Ej inkluderat	44	
Held (2011)	ICEV, Diesel	Mini	Tyskland	Ej inkluderat	28	
Tahara (2001)	ICEV, diesel	1181	Japan	Ej spec.	20	
Mac Lean (2003)	ICEV, Ford Taurus	1798	USA	Ej redovisat	67	EIO-LCA

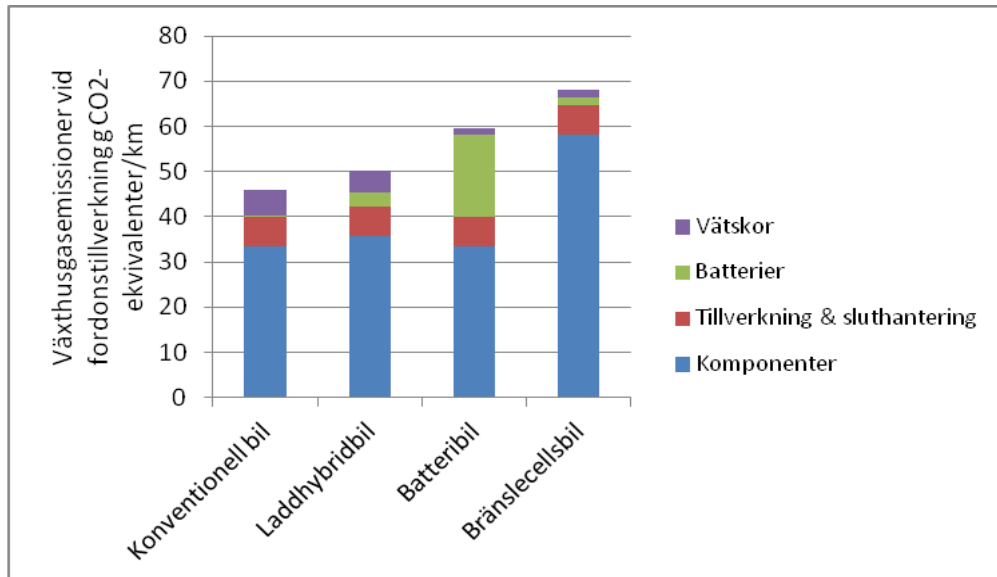
Finkbeiner, (2006)	ICEV, Mercedes S-klass, bensin	1825	Tyskland	Enl ELV direktiv	75	NiMeH
Ma (2012)	ICEV, Porsche Cayenne	1930	Kalifornien	Ej inkluderat	93	Enbart CO ₂ , exkl. samman-sättning och demontering
Helmers (2010)	ICEV, Smart	880	Tyskland		23	Exkl. återvinning
Samaras 2008	ICEV, Toyota Corolla	1280	USA	Inkl. EOL	57	Hybrid LCA
Hawkins (2012)	ICEV, ungefär Mercedes A-klass	1225-1365	Europa	81%	43	
Notter (2010)	ICEV, VW Golf	1320	Tyskland	Inkl. EOL	42	55 kW max effekt
Messagie (2012)	ICEV, VW Golf, bensin,diesel	1320	Belgien	Verklig Belgisk	26	
Baptista (2009)	PHEV	1120	Portugal	Inkl. EOL	44	NiMeH
Hearron (2011)	PHEV , medeltyp	1715	USA	78% fordon, 66% batteri	38,9	Angivet som CO ₂ , ej som CO ₂ eq. GREET 2.7 använd
Held (2011)	PHEV, mellan-klass	1505	Tyskland	Ej inkluderat	72	Inkluderar underhåll av batteri
Samaras (2008)	PHEV30, Toyota Prius	1420	USA	Inkl. EOL	61	SAFT Li-jon (Co, Mn,Al)-katod
Samaras (2008)	PHEV60, Toyota Prius	1500	USA	Inkl. EOL	66	SAFT Li-jon (Co, Mn,Al)-katod
Samaras (2008)	PHEV90, Toyota Prius	1577	USA	Inkl. EOL	71	SAFT Li-jon (Co, Mn,Al)-katod

Hawkins m.fl. studie 2013 resulterar i ett relativt högt CO₂-värde för BEV-bilarna. En stor del av dessa, hänförs till batteritillverkningen. Hawkins refererar till Majeau-Bettez (2011) för data från batteritillverkningen. Där anges ett GWP-värde på 22 kg CO₂eq/kg batteri, vilket är anmärkningsvärt högt. Notter m.fl. (2010) anger en siffra på 6 kg CO₂eq/kg batteri och Samaras och Meisterling (2008) anger 9,6 kg CO₂eq/kg batteri. Det höga värdet relativt andra studier förklaras av Hawkins m.fl av att man ansatt ett betydligt högre värde på energiförbrukningen vid produktion än andra studier och att man inkluderat styrelektronik, som inte tidigare analyserats. En viss betydelse har det också att man använt NMP (ett organiskt lösningsmedel) vid tillverkningen av det aktiva materialet och som man låter avdunsta direkt till atmosfären samt att man använder polytetrafluoretylen (PTFE) som bindningsmedel. PTFE ger upphov till emissioner av halogenerade kolväten och en 14-15%-ig höjning av växthusgasemissionerna.

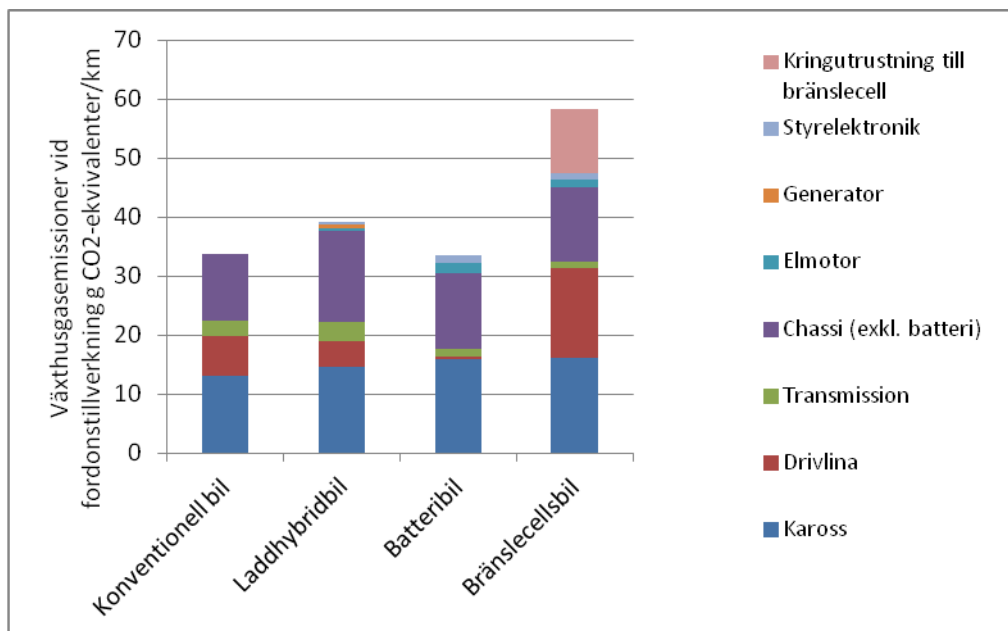
De förhållandevis höga värden för växthusgasemissioner, som VW rapporterat och som nämns i appendix 1 har inte återfunnits som publicerat material. De personer vi varit i kontakt med på VW har inte heller kunnat ge oss något sådant underlag.

3.1.2. Simuleringar med GREET-modellen

Vid de simuleringar med GREET-modellen som vi gjort har körsträckan satts till 150000 km. Den konventionella ICEV-bilen väger där 1353 kg, laddhybriden 1503 kg, batteribilen 1939 kg och bränslecells bilen 1648 kg. Återvinningen är default, enligt tabell 1. Elektriciteten är medel från EU27.



Figur 5 Emissioner från fordonstillverkning med medel-el från EU27



Figur 6 Emissioner från komponenttillverkning med medel-el från EU27

Det som skiljer ut bränslecells bilen från övriga är drivlinan, där bränslecellsstacken och vätgastanken bidrar mest och kringutrustningen till bränslecellen, dvs. systemet för reglering av vätgas och luft-

flöden samt kylning. En PEM-bränslecell av de slag som används idag arbetar vid temperaturer under 100 grader. Därför kräver kylningen stora värmväxlarytor.

3.1.3. Känslighetsanalys

Det finns ett stort antal parametrar som påverkar resultatet:

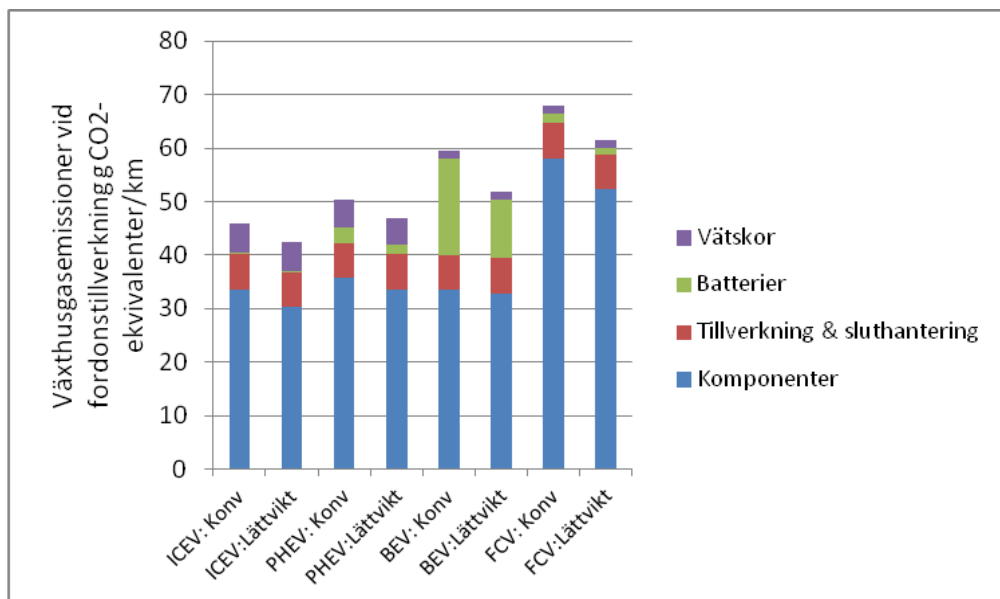
- Bilens storlek
- Materialval
- Drivlinans verkningsgrad
- Prestanda
- Utrustningsnivå
- Livslängd, körsträcka
- Hur mycket fossila bränslen som användes när elektriciteten genereras
- Graden av materialåtervinning
- Teknikens mognadsgrad

Bilens storlek

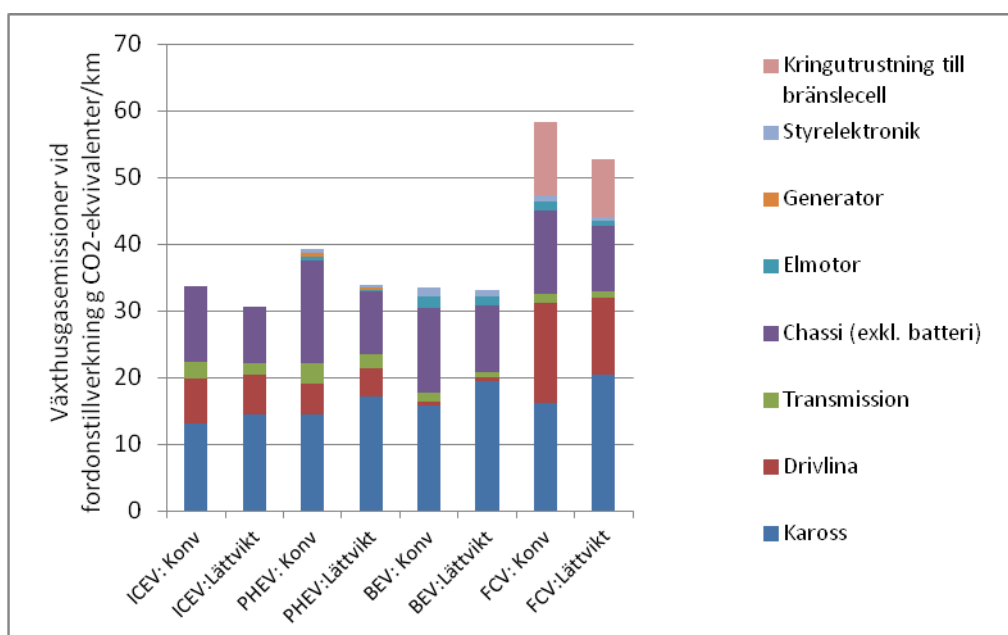
Emissionerna av växthusgaser borde i stort sett vara direkt proportionella mot bilens vikt. Merparten av utsläppen kommer från materialtillverkningen och bara en mindre del från sammansättningen av bilen. I figur 1 – 4 verkar det dock som om förhållandet inte är helt linjärt. Möjligen beror detta på att större bilar har högre utrustningsnivå.

Materialval

I GREET-modellen finns också modellerat ett antal lättviktsmodeller. Själva karossen ger där snarare upphov till ökade växthusgasemissioner än minskade (figur 7), men lägre vikt kräver mindre motorer och batterier och ger lägre energiförbrukning vid drift. Det är ju främst kompositmaterial och lättmetaller såsom aluminium och magnesium som används i lättviktskonstruktioner. Så som GREET-modellen räknar på återvunnet material (hur det används i tillverkningsfasen snarare än vad som händer efter skrotningen) får man antagligen en konservativ (låg) skattning av fördelarna med lättviktsmetaller.



Figur 7 Användning av lättviktsmaterial i stället för konventionella material minskar de totala emissionerna av växthusgaser från tillverkning och skrotning



Figur 8 Användning av lättviktsmaterial i stället för konventionella material minskar de totala emissionerna av växthusgaser från komponenttillverkning tillverkning och skrotning, men ökar de från karosstillverkning

Drivlinans verkningsgrad

Enligt Hawkins et al (2012) varierar den uppskattade energiförbrukningen i litteraturdata mellan 0,1 och 0,24 kWh/km, vilket i sin tur påverkar dimensioneringen av batteristorleken för att kunna uppnå önskad total körsträcka, och därmed miljöpåverkan vid tillverkning i motsvarande grad.

Prestanda

När man skall jämföra olika bilmodeller och dess betydelse för de samlade växthusgasemissionerna blir en relevant fråga vad man egentligen väljer mellan. Är det bara utrymmet eller vägs körlängd per tankning, acceleration och kostnad in? Samaras (2008) har räknat på tre laddhybrider med 30, 60 och 90 km körsträcka på batteriet och funnit växthusgasemissioner mellan 61 och 71 g/km.

De flesta Livscykelanalyser på batteribilar räknar med en räckvidd på ca 160-200 km.

Figur 5 visar batteriets andel av batteribilen växthusgasemissioner, cirka 18 g/km. Batteriet är där på 63 kWh. Vill man ha fördubblad körsträcka ökar emissionerna till 36 g/km.

Utrustningsnivå

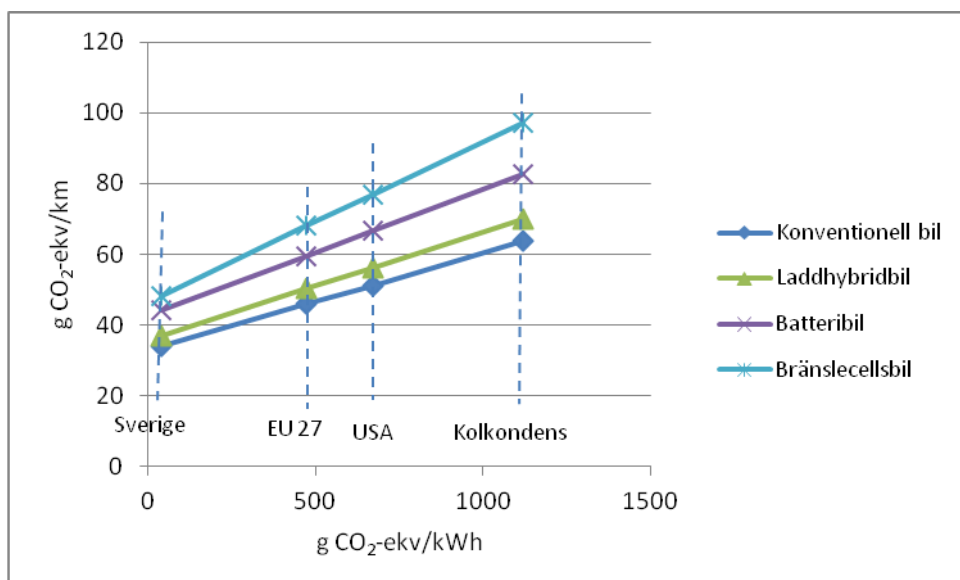
Utrustningsnivån har stor betydelse för användningen av sällsynta jordartsmetaller och andra specialmetaller. Se nedan i avsnittet om mineralresurser.

Livslängd, körsträcka

Här finns ett enkelt samband. Emissionen av växthusgaser från fordonslivscykeln är omvänt proportionell mot körsträckan under bilens livstid.

Fossilbränslen i elproduktionen

Dagens elproduktion baseras till stor del på fossila bränslen. Därmed kan elanvändning vid fordonstillverkning indirekt medföra koldioxidutsläpp. Vi får en viss mängd CO₂-ekv./kWh el. GREET-modellen ger möjlighet att undersöka hur de sammanlagda växthusgasemissionerna från fordonstillverkningen varierar med koldioxidemissionerna i elproduktionen. Resultatet av en sådan beräkning vi gjort, visas i figur 9. Att inte linjerna går genom origo beror på att fossilbränslen användes vid bl. a. stål, aluminium och plasttillverkning utan att ha med elproduktionen att göra. Koksverk, sintringsverk, masugnar, konvertrar, ugnselektroder och petrokemisk industri förbrukar mycket fossila resurser. Om även koldioxidutsläppen från dessa processer minskar i framtiden så reduceras utsläppen från bilens livscykel ytterligare (linjerna i figur 9 förskjuts neråt).



Figur 9 Växthusgasemissioner vid fordonstillverkning som funktion av elproduktionens koldioxidutsläpp. De positiva utsläppen för koldioxidneutral produktion (där linjerna skär y-axeln) beror på användningen av fossila bränslen vid tillverkning av material som stål, aluminium och plast. De streckade, lodräta linjerna anger hur mycket CO₂/kWh som i medeltal bildas i Sveriges elproduktion, i EU27, i USA och vid ren kolkondenskraft. Beräkningarna är gjorda med GREET-modell v.2.7.

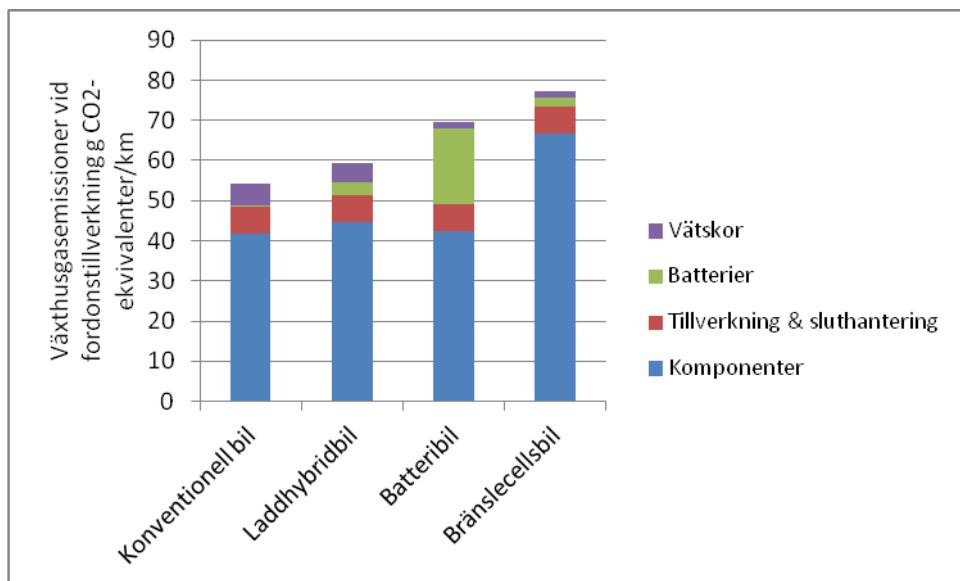
Återvinning

Användningen av återvunnet material ger i regel en miljövinst jämfört med nytillverkning av jungfruligt material, eftersom upparbetningen från skrot innebär lägre emissioner och lägre förbrukning av naturresurser än primärproduktionen. I de studier vi tittat på används två sätt att räkna dessa miljövinster på. GREET-modellen bokför lägre miljöbelastning beroende på hur mycket återvunnet material man använder vid tillverkningen av bilen och hur mycket jungfruligt material man använder. Modellen bokför även den miljöbelastning som blir vid själva skrotningen, dvs. demontering, fragmentering och sortering. Den miljöbelastning som man räknar med vid användningen av återvunnet material är lika med miljöbelastningen som blir när man upparbetar kvalitén från skrotråvara till konstruktionsmaterial. Detta sätt att bokföra på brukar motiveras med att det stimulerar till användning av återvunnet material, och det stimulerar därmed återvinningen som sådan. Nackdelen är att det minskar motivationen för att konstruera för återvinning, eftersom det inte kostar i miljöbelastning att ha låga återvinningsgrader vid skrotningen. Ett alternativt sätt att bokföra är att tillskriva allt material ett värde som är lika med miljöbelastningen vid tillverkning av jungfruligt material och att sedan kreditera miljövinsten i produktens avfallsled, t.ex. vid återanvändning eller materialåtervinning.

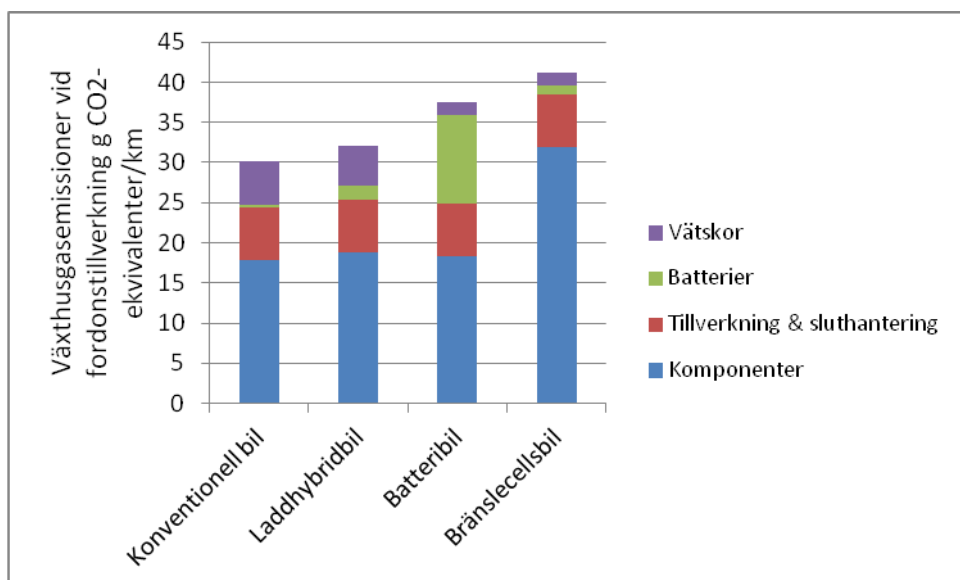
I den här utredningen söker vi bestämma konsekvensen för de nationella eller globala utsläppen. Hur marknaden för respektive material ser ut avgör då om tillförsel av återvunnet material till tillverkningen alternativt tillförseln av skrotråvara till marknaden är bestämmande för den nationella eller global återvinningsgraden och därmed faktiskt leder till minskade emissioner. Att döma av prisbildningen på metallskrotråvara kommer i stort sett allt återvunnet material till användning, varför den faktiska miljöbelastningen bör bli lägre än default-inställningen i GREET-modellen anger. Detta beror på att återvinningen vid skrotning är betydligt högre (uppemot 85 %) än andelen återvunnet material, som används vid tillverkningen (30 %) och i GREET-modellens defaultinställning. Skillnaden mellan de två sätten att räkna bör vara ungefär lika stor som den skillnad vi funnit med hjälp av GREET-modellen, när vi antagit 100 % återvunnet av metallerna i tabell 1 (jämför figur 5 och 11).

Oavsett vilken beräkningsmetod som används, blir miljöbelastningen i regel lägre vid ökad grad av återvinning. I figur 10 och 11 nedan visas resultaten av en simulering med GREET-modellen där användningen av återvunna metaller enligt tabell 1 material antagits vara 0 resp 100 %. Detta ger en uppfattning om hur materialåtervinning påverkar resultatet.

De default-återvinningsdata som antagits i GREET-modellen och vars resultat tidigare redovisats i figur 5, framgår av tabell 1



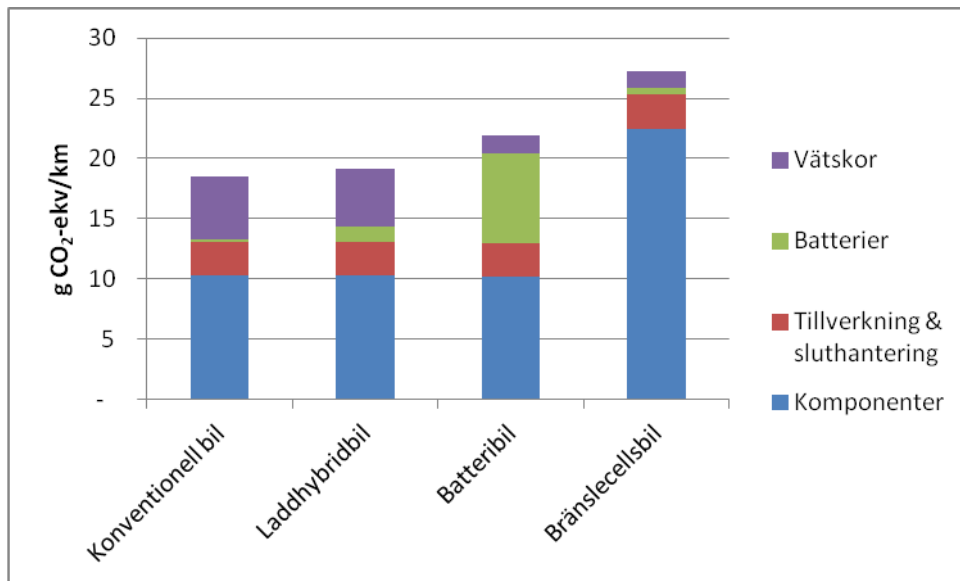
Figur 10 Växthusgasemissioner vid 0 % återvinning



Figur 11 Växthusgasemissioner vid 100 % återvinning av stål, aluminium, bly och nickel. Övrigt material (glas, plast, gummi mm., 18 % för konventionell bil och laddhybrid, 20 % för batteri och 27 % för bränslecells bilen) återvinns ej.

Resultaten i figur 10 och 11 visar på att emissionen av växthusgaser minskar till nästan hälften vid användning av återvunnet material. Detta beror på att det mesta av växthusgasemissionerna kommer från de material som används i stora mängder, såsom stål, gjutjärn och aluminium. För återvunnen platina minskar växthusgasemissionen med en tiopotens och förbrukningen av jungfrulig platina minskar med återvinningsgraden.

Om man både har 100 % metallåtervinning och bara använder fossilfri el, t.ex. vattenkraft, blir växthusgasemissionerna enligt GREET-modellen tämligen låga, se figur 12.



Figur 12 Växthusgasemissioner vid 100 % återvinning av stål, aluminium, bly och nickel samt enbart användning av fossilfri el.

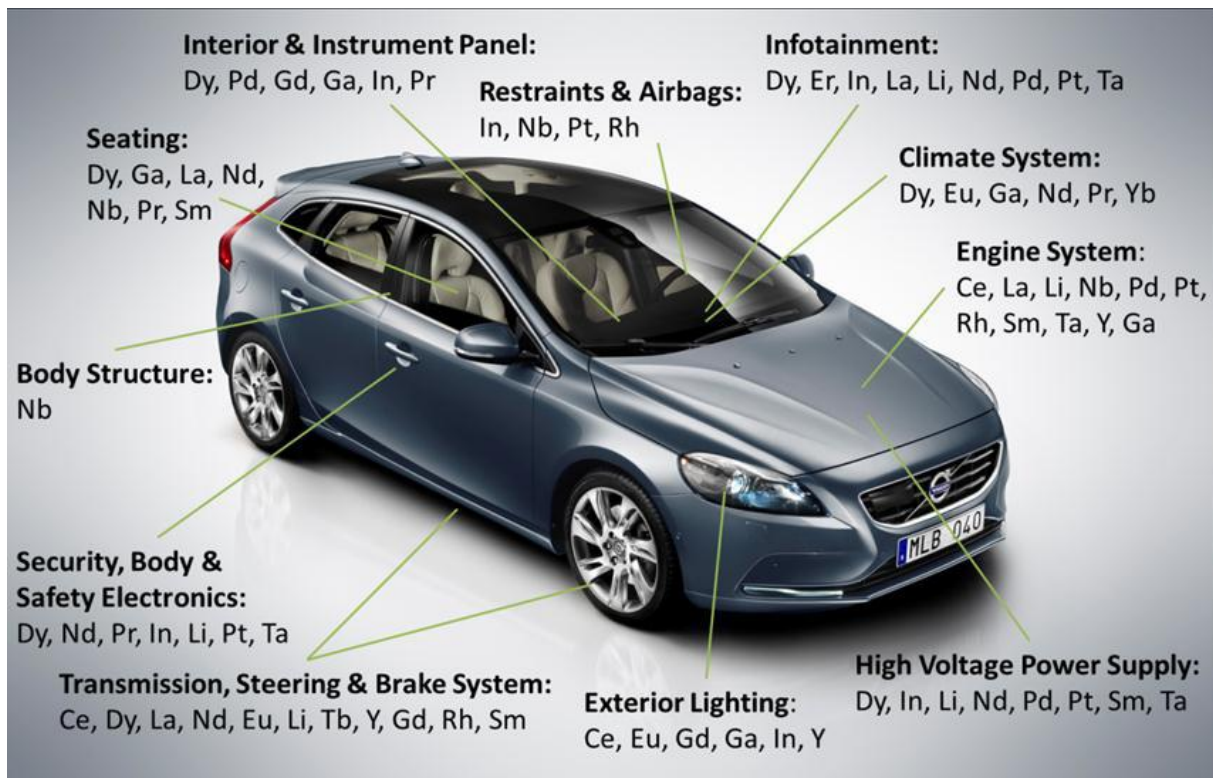
Teknikens mognadsgrad

Endast bilar med förbränningsmotorer och möjligen Toyotas hybridbilar kan betraktas som mogen teknik. Laddhybrider, batteribilar och bränslecellsbilar finns endast som enstaka konceptbilar eller i mindre serier. Man bör därför kunna förvänta sig att vikten hos laddhybrider och elfordon kan minska i framtiden genom storskalig och mer effektiv produktion, att återvinningstekniken effektiviseras för övriga ämnen (specialmetaller, plast, gummi, glas etc.) och att miljöbelastningen därmed minskar.

3.2. Förbrukning av mineralresurser

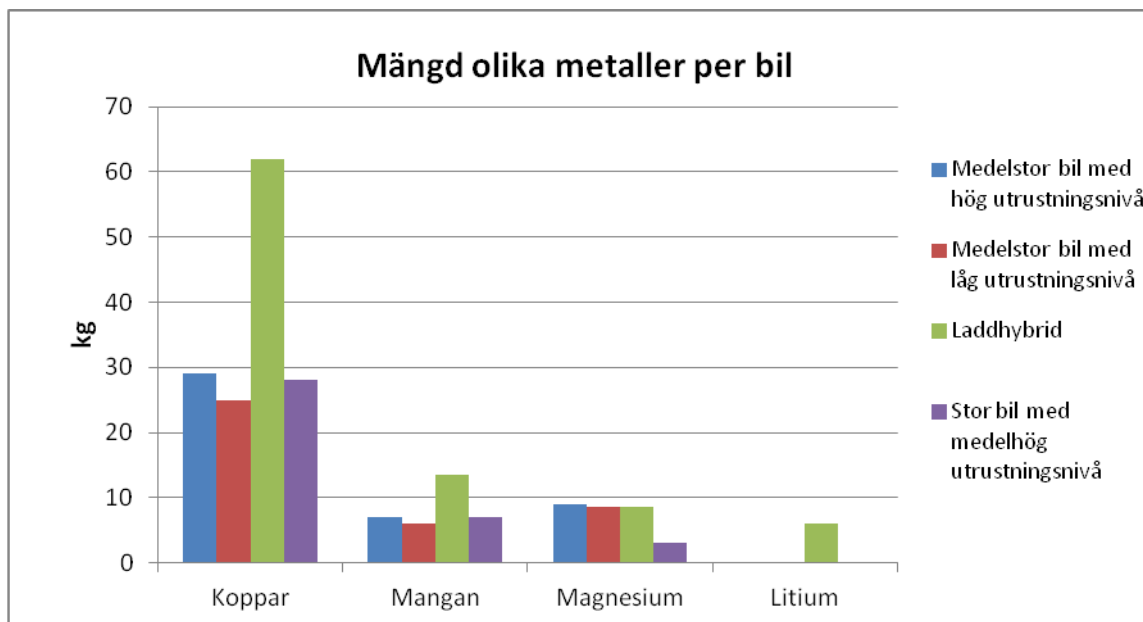
Koldioxidemissionerna kan tjäna som mått på förbrukningen av fossila resurser. Men en elektrifiering drivsystemen innebär också förbrukning av sällsynta metaller och metaller vars tillgång av andra skäl är begränsad. Dessa metaller benämns ofta "kritiska metaller" (EC 2010).

Cullbrand och Magnusson (2011) inventerade användningen av kritiska material i fyra Volvo-modeller. De fann att dessa ämnen användes på en mängd olika ställen (figur 13).

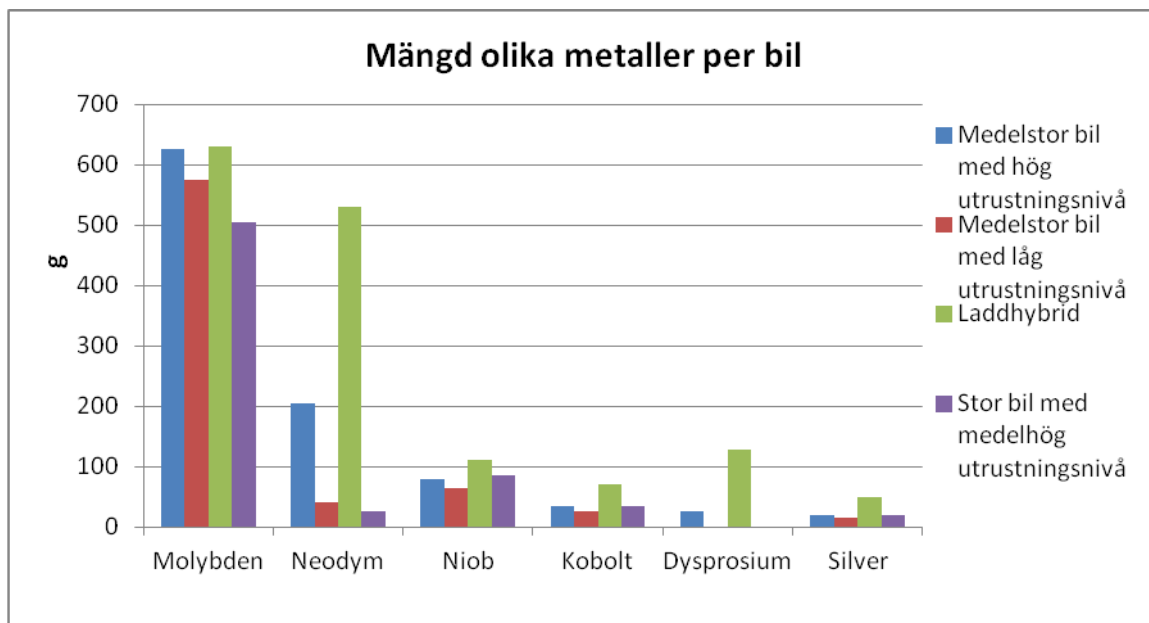


Figur 13 Användningen av kritiska metaller i en personbil (Cullbrand och Magnusson 2011).

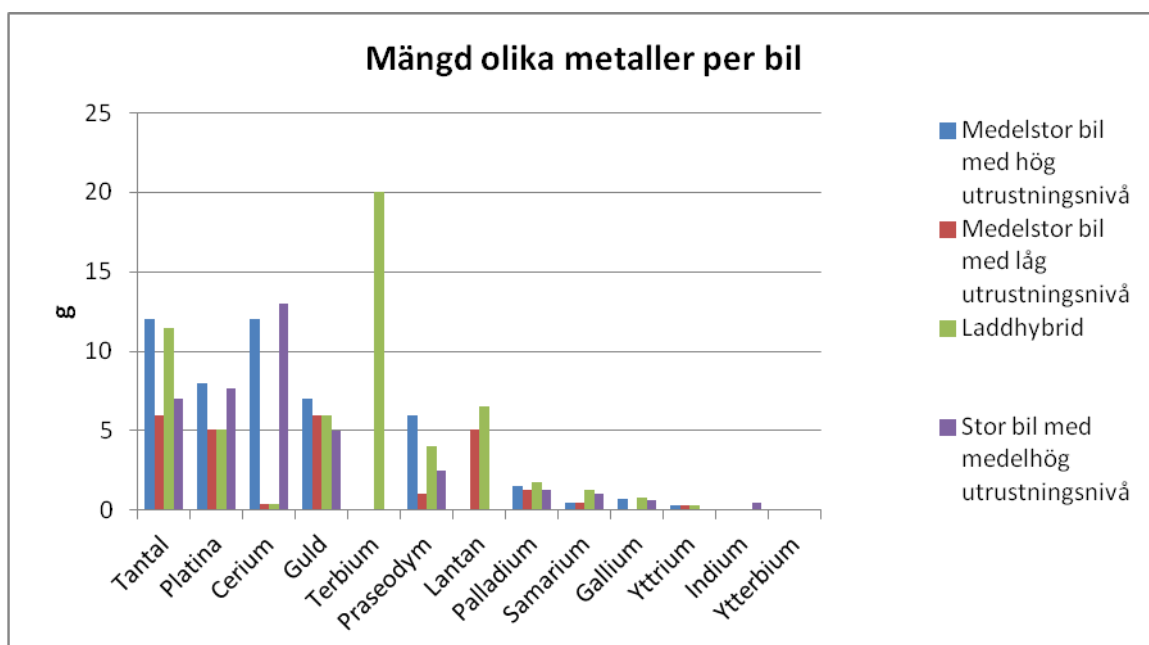
Den sammanlagda mängden av ett antal potentiellt kritiska metaller, som används i olika bilmodeller visas i figur 14 -16.



Figur 14 Metaller som används i mer än 1 kg (Cullbrand och Magnusson 2011).



Figur 15 Metaller som används i mängder mella 45g och 1 kg (Cullbrand och Magnusson 2011).

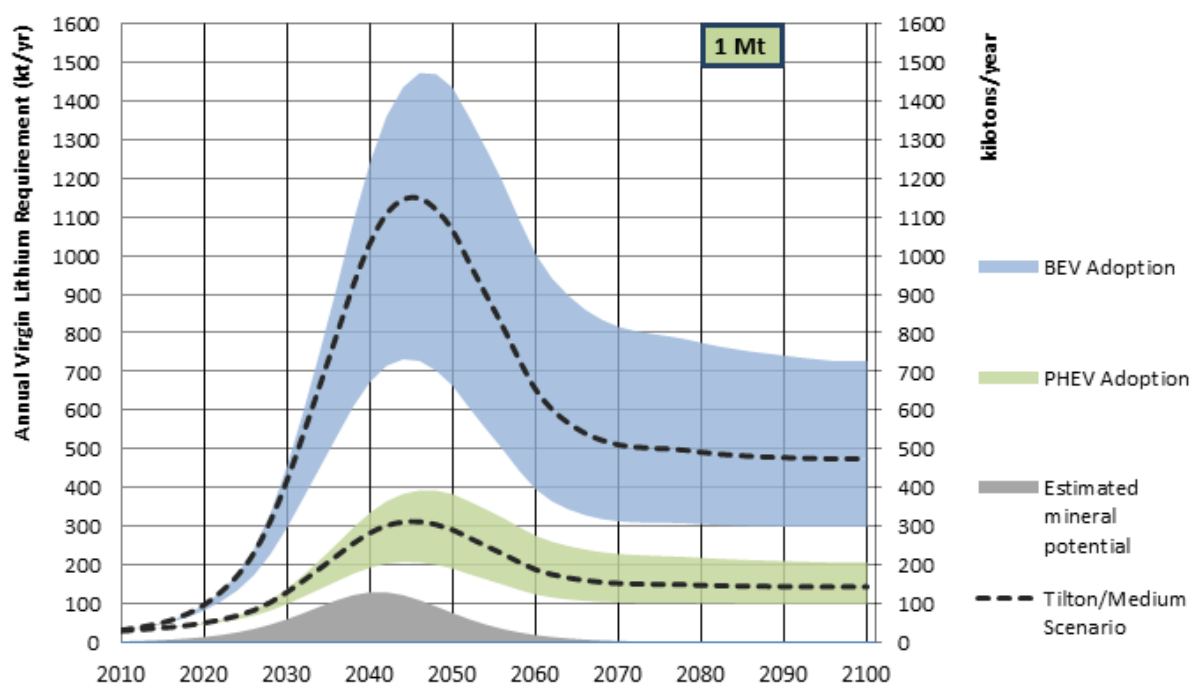


Figur 16 Metaller som används i mängder mellan 0,5-45g (Cullbrand och Magnusson 2011).

Cullbrand och Magnusson (2011) bedömer att för de fordon de analyserat, ökar mängden koppar, dysprosium, litium, mangan, neodym, samarium, silver och terbium vid elektrifiering av drivlinan. Ökad utrustningsnivå ökar mängden koppar, dysprosium, gallium, litium, neodym, praseodym och tantal. Valet av katalytiskt avgassystem påverkar mängden cerium, lantan, palladium och platina. Analysen kunde inte påvisa att bilens storlek har betydelse för mängden potentiellt kritiska material, men det beror sannolikt på att den större bilmodellen designades tidigare och med andra materialval än övriga modeller.

Det är viktigt att påpeka att den allmänna utvecklingen av fordon, och inte enbart elektrifieringen, kan öka användningen av potentiellt kritiska material. Både lagkrav och kunddrivna krav bidrar, som t ex katalytisk avgasrening, utrustning för säkerhet och förarassistans liksom utrustning för ”infotainment” (Ljunggren Söderman et al 2013).

Om alla bilar på jorden skulle vara laddhybrider eller batteribilar skulle behovet av några metaller kunna öka mångfald. Kushnir och Sanden (2012) har visat på problemet att få fram tillräckligt mycket litium. I några olika scenarier har de konstaterat att det behövs både en effektiv återvinning av använt litium och en radikalt uppskalad utvinning av jungfruligt litium (figur 17). Dagens utvinning av litium på omkring 25 kton/år skulle räcka till mindre än fem miljoner elbilar per år, även för optimistiska antaganden om batteriutveckling och under antagandet att litium inte användes till något annat.



Figur 17 Uppskattat behov av litiumresurser. Behovskurvorna bygger på antagande om 80% återvinning. Nedre delen av varje band representerar ett scenario med 0,2 bilar per capita och det övre 0,5 bilar per capita. Från Kushnir och Sanden (2012)

Det finns idag flera olika typer av litiumjonbatterier. Det är inte bara koppar, mangan och litium som kan bli begränsande material för batteritillverkningen. Kobolt, tenn och nickel är också aktuella för användning i litiumjonbatterier och kan eventuellt behövas i mängder som är i samma storleksordning eller större än vad som utvinns i dagens gruvbrytning.

För bränslecellsbilarna är det främst platina, som kan vara ett problem. GREET-modeller antar en platinamängd om cirka 100 gram. Det lär vara den mängd som finns i Hyundays FCV. Dagens globala platinaproduktion är 183 ton/år (USGS, 2011). Det skulle räcka till 1,8 milj FCV-bilar per år.

3.3. Övriga emissioner

Med hjälp av GREET-modellen har vi även beräknat emissionerna av andra ämnen (tabell 3). Skillnaderna mellan de olika biltyperna följer i stort sett mönstret för växthusgaserna.

Tabell 3 Emissioner från tillverkning av olika fordonstyper enligt GREET-modellen. Körsträckan är 150 000 km. Konventionella material och medel-el från EU 27 används.

	Konventionell bil	Laddhybrid	Batteribil	Bränslecellsbil
Total energi (MJ/km)	0,67	0,72	0,87	0,99
Fossila bränslen (MJ/km)	0,60	0,64	0,76	0,87
Kol (MJ/km)	0,23	0,25	0,29	0,30
Naturgas (MJ/km)	0,26	0,28	0,36	0,43
Olja (MJ/km)	0,11	0,12	0,12	0,14
CO ₂ (g/km)	40	44	53	60
CH ₄ (g/km)	0,17	0,18	0,23	0,27
N ₂ O (mg/km)	0,60	0,65	0,78	0,91
GHGs (gCO ₂ eq/km)	46	50	60	68
VOC (g/km)	0,23	0,23	0,23	0,23
CO (g/km)	0,16	0,17	0,17	0,19
NO _x (g/km)	0,056	0,061	0,074	0,083
PM ₁₀ (g/km)	0,062	0,068	0,087	0,088
PM _{2.5} (g/km)	0,023	0,026	0,034	0,032
SO _x (g/km)	0,15	0,21	0,29	0,28

Ett uppmärksammat miljöproblem hänger ihop med utvinningen av sällsynta jordartsmetaller i Kina. Negativa effekter på såväl arbetsmiljö som yttre miljö har rapporterats i media. (Guardian Weekly 2012, Ives 2013). De kraftiga miljöstörningarna hänger samma med dels en allmänt undermålig miljövärd, dels med att man använder hydrometallurgiska utvinningsprocesser, dvs. man lakar stora mängder mineral med syra och får stora mängder suspensioner att hantera, däribland syrahaltigt avfall. I avfallet finns radioaktivt torium, och lakvattnet bedöms förorena kringliggande marker och grundvatten. Malmerna är vidare låghaltiga och komplexa, vilket bidrar till att processen att särskilja de sällsynta jordartsmetallerna blir extra besvärlig. De sällsynta jordartsmetallerna är egentligen inte särskilt sällsynta. De utvanns förr på flera håll i världen. Utvinningen flyttades efter hand till Kina av rena kostnadsskäl. Idag förbereder man åter brytning på andra håll i världen, men det tar lång tid att starta ny gruvverksamhet.

4. Diskussion

4.1. Validering, rimlighetsbedömning

En grov uppskattning av emissioner och resursanvändning kan man få via materialsammansättningen hos en bil. I tabell 4 nedan återges den materialsammansättning som VW redovisar för sin Golf Blue Motion (VW 2008). Bilen är dieseldriven och väger 1249 kg utan last. I tabellen har vi också lagt in typiska material som får representera materialgrupperna och deras ungefärliga växthusgas-

emissioner vid tillverkning av jungfruligt material. Den totala emissionen av växthusgaser motsvarar 33 g/km vid en körsträcka på 150 000 km, vilket är i överensstämmelse med de litteraturdata som visats i figur 1.

Tabell 4 överslagsberäkning av totala växthusgasemissioner vid tillverkning av konstruktionsmaterialen till en VW Golf BlueMotion.

Material	Indikatorämne	Ung. Emission/kg (kg CO ₂ -ekv.)	Viktsandel (%)	Emission/bil (kg CO ₂ -ekv.)
Järn och stål	Stål	4,5	65	3653
Lätta legeringar	Al	8	6	600
Icke-järn metaller	Cu	3	2	75
Specialmetaller	Mo	17	0,02	4
Polymermaterial	Polyeten	1,3	18	292
Processpolymerer	Polyeten	1,3	1	16
Övrigt + komposit	Polyester	5,3	3	199
Elektronik		10	0,01	1,2
Bränsle mm	Diesel	0,7	5	44
Summa				4884

De mycket höga värden för elbilar, speciellt bränslecells-bilar, som redovisats av VW, (Appendix 2) är svåra att förklara. Möjligen kan man under mycket specifika omständigheter komma upp i dessa tal, om man bortser från all återvinning och enbart använder kolkraft för elproduktion. GREET-modellen ger i sådana fall 107 g/km för bränslecells-bilen och 93 g/km för batteribilen, jämfört med 73 g/km för den konventionella bilen och 80 g/km för laddhybriden.

4.2. Möjlighet att minska miljöbelastningen med hjälp av teknisk utveckling etc.

Nya lättare material tycks bara marginellt kunna minska emissioner av växthusgaser vid tillverkningen (figur 7 och 8).

En effektivare återvinning av elbilskomponenter kommer att ha en tydlig effekt på skillnaderna mellan de olika biltyperna. För bränslecellbilarna kanske möjligheten finns att återanvända lagringstankarna för vätgas. De består av kolfiberkomposit och aluminium. Kolfiberkomposit är svår att materialåtervinna, men den borde inte "slitas ut" vid användningen. Ändrade modeller, säkerhet och teknikutveckling kan dock försvåra återanvändningen. Platinametallen i bränslecellerna betingar ett så pass högt värde och är lätt att återvinna från bränslecellsstackarna, så man bör kunna anta att återvinningen kommer att bli nära nog hundra procentig.

Det finns två utvecklingslinjer inom bränslecellstekniken som kan ge lägre miljöbelastning. Den ena går mot högttemperatur-PEM, vilket leder till behov av mindre kylare och ger större möjligheter att ersätta platina som katalysator. Den andra är utvecklingen av SOFC-bränsleceller. Fördelen med SOFC-tekniken är att man inte är bunden till vätgas utan kan använda flera olika bränslen samt att

man inte behöver platina som katalysator. Nackdelen är att man använder keramiska material, vilka är känsliga för snabba temperaturförändringar och svårare att massproducera jämfört med polymermembranbränsleceller.

I GREET-modellen har man räknat på ett Li-jonbatteri av typen LiMn_2O_4 , som ger en energitäthet på 102 Wh/kg. Det finns ett flertal andra Li-jonbatterier innehållande ämnen som Co, Ni, Fe, Sn, P och S. För några av dem diskuterar man energitätheter på över 200 Wh/kg, vilket skulle innebära att batteriet skulle kunna halveras i storlek med reducerad vikt och energiförbrukning vid användning.

Vid tillverkningen av batterier är emissionen av växthusgaser från tillverkning av ingående material förhållandevis liten. De största mängderna kommer från sammansättningen. Malningen av det aktiva materialet till anod och katod är där en mycket energikrävande process, som kan kräva upp emot 100 MJ/kg (Kushnir och Sandén 2011). Malning av järnmalm som sker i större skala fordrar inte mer än 0,2 MJ/kg. Här borde finnas möjligheter till förbättringar.

5. Behov av ytterligare studier

Vi har ovan pekat på ett par faktorer som har särskilt stor betydelse för vilka växthusgasemissioner som sker och där det råder osäkerhet:

- 1) Hur produktionen av jungfruligt material påverkas av ökad användning av återvunnet material resp. tillförsel av använt material. Detta kan vara olika i olika länder.
- 2) Hur fossilbränsleutfasningen i elproduktionen kommer att påverka växthusgasemissionen från fordonslivscykeln

Det finns en målkonflikt mellan å ena sidan minskade växthusgasemissioner och användning av fossila resurser och å andra sidan användning av begränsade resurser av metaller. Denna bör studeras närmare.

Fler studier liknande den som genomförts av Cullbrand och Magnusson (2011) är av intresse för att se om deras resultat även gäller andra bilmärken och modeller.

6. Slutsatser

- Elbilar har en något större miljöbelastning från fordonslivscykeln än konventionella bilar.
- Nivåerna är starkt beroende på vilken återvinningsgrad som antas. De flesta studier som gjorts räknar med reducerad miljöbelastning från det återvunna material, som används vid tillverkningen, vilket utgör ungefär 30 % av fordonsvikten. Om man i stället räknar med samma reduktion av miljöbelastningen (per viktsenhet material) vid skrotningsfasen, där den totala återvinningsgraden är uppemot 85 % får man betydligt lägre miljöbelastning.
- Emissioner av växthusgaser vid produktion av de studerade fordonen är, liksom vid användning, ungefärligt proportionella mot fordonets vikt. Användningen av lättviktsmaterial minskar vikten med 30-40% men emissionen av växthusgaser med endast cirka 10 % enligt GREET-modellen.

- Utrustningsnivån har stor betydelse för förbrukning av specialmetaller.
- Emissionerna per km är omvänt proportionella mot fordonets körsträcka under användningsfasen.
- Fossilbränsleanvändningen vid framställning av el har stor betydelse. Om alla material och fordon tillverkades med svensk el (eller mer generellt nästan koldioxidneutral el) blir växthusgasemissionerna från fordonslivscykeln bara hälften av de som uppstår om man använder el från kolkraft. Om övriga koldioxidutsläpp vid produktion av ingående material som stål och plast minskar i framtiden så reduceras utsläppen från bilens livscykel ytterligare.
- Tekniken i laddhybrider och elbilar, samt produktionen av drivlinans komponenter, är ännu relativt omogen. En stor potential finns för utveckling av lättare och effektivare komponenter, förbättrad systemverkningsgrad samt mer storskalig och energieffektiv tillverkning. Behovet av vissa specialmetaller till batterier och bränsleceller, såsom Li, Co, Ni, Sn och Pt, kommer att kräva en utveckling av effektivare återvinningsteknik om omställningen till laddhybrider och elbilar skall kunna ske i någon betydande omfattning.
- Emissioner av VOC, SO_x, NO_x, PM₁₀ och PM_{2,5} följer i stort sett samma mönster som växthusgaserna i förhållandet mellan de olika fordonstyperna.

7. Referenser

Cullbrand, K. och Magnusson, O. (2011); The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Cars, (2011), Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Division of Environmental System Analysis, Gothenburg, Sweden, 2011, Report No. 2012:13.

European Commission (2010); *Critical raw materials for the EU*. Tillgänglig via:

http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm

Finkbeiner (2006); Matthias Finkbeiner, Rüdiger Hoffmann, Klaus Ruhland, Dieter Liebhart and Bruno Stark, Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class, *Int J LCA* 11 (4) 240 – 246 (2006)

Guardian Weekly (2012) <http://www.guardian.co.uk/environment/2012/aug/07/china-rare-earth-village-pollution>

Gao (2012); Gao L och Winfield Z, Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles, *Energies* **2012**, 5, 605-620; doi:10.3390/en5030605

Hawkins (2012); Hawkins T, Gausen O M and Strømman AH, Environmental impacts of hybrid and electric vehicles – a review, *Int J Life Cycle Assess*, September 2012, Volume 17, Issue 8, pp 997-1014

Hawkins (2013); Troy R Hawkins, Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, and Anders Hammer Strømman, Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, *Journal of Industrial Ecology*, Vol 17, p. 53-64, 2012

Hearron (2011); Joseph David Hearron, Matthew McDonough, Amir Ranjbar, Wei Wang, Chenjie Lin, Pourya Shamsi, Sujan Manohar, and Babak Fahimi, The Sustainability of New Technologies in Vehicular Transportation, IEEE 2011, 978-1-61284-247-9/11

Held et al. (2011); M. Held and M. Baumann, Assessment of the Environmental Impacts of Electric Vehicle Concepts, s. 535-546 i M. Finkbeiner Towards Life Cycle Sustainability Management, DOI 10.1007/978-94-007-1899-9_52, © Springer Science+Business Media B.V. 2011

Helmers (2012), Eckard Helmers and Patrick Marx, Electric cars: technical characteristics and environmental impacts, Environmental Sciences Europe 2012, 24:14

Ives (2013); Mike Ives, Boom in Mining Rare Earths Poses Mounting Toxic Risks, Yale Environment 360, 28/1 (2013) available at

http://e360.yale.edu/feature/boom_in_mining_rare_earths_poses_mounting_toxic_risks/2614/

Jankovic (2010); A. Jankovic, H. Dundar, and R. Mehta, Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, March 2010.

Kushnir (2012); Duncan Kushnir* and Björn A. Sandén, (2012) the Time Dimension and Lithium Resource Constraints for Electric Vehicles, Resources Policy, Volume 37, Issue 1, March 2012, Pages 93–103

Kushnir, D. ; Sandén, B. A. (2011). Multi-level energy analysis of emerging technologies: a case study in new materials for lithium ion batteries, Journal of Cleaner Production, 19 (13) s. 1405-1416.

Ljunggren Söderman, M., Kushnir, D. and Sandén, B. (2013) Will metal scarcity limit the use of electric vehicles?, forthcoming in Systems perspectives on electromobility, Chalmers University of Technology.

Ma (2012), Hongrui Ma, Felix Balthasar, Nigel Tait, Xavier Riera-Palou, Andrew Harrison, A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles, Energy Policy 44 (2012) 160–173

Majeau-Bettez (2011); Guillaume Majeau-Bettez, Troy R. Hawkins, and Anders Hammer Strømman, Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles, Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 4548–4554

Notter m.fl. (2010); Dominica Notter, Marcel Gauch, Rolf Widmer, Patrick Wäger, Anna Stamp, Rainer Zah, och Hans-Jörg Althaus Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles, Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 6550–6556

Samaras and Meisterling (2008); Constantine Samaras och Kyle Meisterling, Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 3170–3176

Tahara (2001); Kiotaka Tahara, Sangeeta Sinha, Ryuichi Sakamoto, Toshinori Kojima, Katsunori Taneda, Atsushi Funasaki, Toshitake Ohtaki, Atsushi Inaba, Comparison of CO₂ Emissions from Alternative and Conventional Vehicles, World Resource Review, Vol 13, 1, 52-60.

USGS (2011) <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2011-plati.pdf>

Wang (2012); GREET Life Cycle Model, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory; IL, USA, nerladdningsbar från <http://greet.es.anl.gov/>

VW (2008); The Golf Environmental Commendation – Background Report