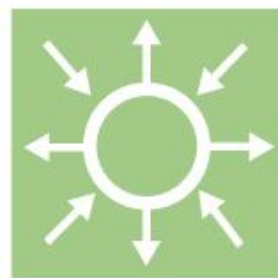




Litium-jonbatterier från miljö- och hälsosynpunkt

En litteraturstudie

Elforsk rapport 09:56



Gunnar Hovsenius

April 2009

ELFORSK

Förord

Elforsk bedriver ett omfattande kunskaps och utvecklingsprogram kallat "Laddhybrider och elfordon". Inom programmet finns ett antal delprojekt, bl.a. projekt kring kundfrågor, miljöanalyser, styrmedel, elmätning, standardisering av laddningsutrustning, debiteringssystem och laddningsinfrastruktur. Denna rapport är en del av denna satsning.

Stefan Montin
Programområde Omvärld och system
Elforsk

Sammanfattning

Ansträngningarna för att minska utsläppen av koldioxid måste inom en snar framtid också innefatta biltrafiken. Biodrivmedel har en mycket begränsad möjlighet till detta medan eldrivna fordon har en mycket stor potential. Detta förutsätter att batterier utvecklas till att klara cirka 20 mils körning. Alternativt kan man tänka sig en utveckling där eldriften begränsas till att i huvudsak ske i tätortsmiljöer (så kallade plug-in hybridfordon).

Litium-jonbatterier har den största potentialen till att klara ovanstående krav på ett miljöanpassat sätt. Deras tekniska utveckling har kommit så långt att de sannolikt kan utnyttjas kommersiellt i bred skala redan inom loppet av cirka fem år. Återvinningen av de metaller som ingår i batterierna är i princip känd och att minst 70 % av metallerna skall återvinnas anses som realistiskt.

Viktiga komponenter i litium-jonbatterier är vid sidan av litium tre andra metaller nämligen kobolt, nickel och mangan. De används som alternativa hjälp-katodmaterial. På sikt kan en syntetisk form av järnfosfat bli aktuell för detta. Anodmaterialet utgörs av kristallin grafit. Transporten av litiumjoner mellan de två elektroderna sker genom ett organiskt lösningsmedel.

Denna litteraturgenomgång har omfattat hur stora de globala tillgångarna av de fyra metallerna anses vara, var de finns, hur de används idag, hur användningen förändras om biltrafiken i mycket stor omfattning kommer att baseras på eldrivna fordon och hur miljö och hälsa kan påverkas av att nyttjandet av dessa metaller ökar.

I korthet kan kunskaperna från litteraturen sammanfattas i följande punkter:

- Litiumtillgångarna är koncentrerade till Syd- och Nordamerika samt till Kina. Vid sidan av annan användning räcker de för att tillverka fordonsbatterier i mer än 300 år.
- Kobolttillgångarna finns främst i Afrika, i Australien och i Kina. De kända tillgångarna räcker dock bara för cirka tio års batteritillverkning och därför måste hoppet stå till andra metaller som katodmaterial.
- Nickeltillgångarna är mer spridda än för kobolt och litium. Vid sidan av annan användning räcker de kända tillgångarna för att tillverka fordonsbatterier i minst 100 år. Detsamma kan sägas om mangan, men här är tidsfönstret sannolikt mer än 200 år.
- Den ofullständiga återvinningen av metallerna ökar deras omsättning i naturen. Detta till trots behöver man inte befara att negativa miljö- och hälsoeffekter uppkommer. Detta beror på att den extra belastningen inte leder till att halterna uppnår de nivåer som med stor försiktighet satts upp som konservativa miljögränser.
- Tillverkningen av batterier medför att CO₂ emitteras. Batteriernas klimatbelastning är dock med svensk el som utgångspunkt redan intjänad efter 1210 mils körning. För hybridfordon nås intjäningsgränsen redan efter 200 mil.
- För anodmaterialet liksom det lösningsmedel som behövs för transporten av litiumjoner i batteriet ses inga egentliga begränsningar eller miljöproblem.

Summary

The global efforts to reduce the emissions of CO₂ must in a near future also involve car traffic. Biofuels can in this context only contribute to a very limited possibility while battery-operated cars have a very good potential supposed that batteries can be developed to cover driving distances of about 200 kilometers. An alternative possibility is plug-in hybrid cars for which electricity is the energy source for transportation in urban areas.

Lithium-ion batteries have the best potential to match the above mentioned battery claims. Their technical development has advanced so far that they probably will be utilized commercially in a large scale within a period of about five years. The recovery of the metals in the batteries is in principle a known technology and the goal to recover 70 % is considered as realistic.

In the constructions of the cathode cobalt, nickel and manganese are of importance besides lithium. In the future a synthetic application of ferrous phosphate may be used as an alternative. The material in the anode is a crystalline form of graphite. The transport of lithium ions between the two electrodes occurs in an organic solvent.

This literature study has covered the global reserves and resources of the four mentioned metals, their actual market, how their applications will be changed if battery-operated cars will take a very dominant market role and if this will have any influences on the health and environmental situations.

The knowledge from the literature study is summarized in the following bullets:

- The reserves of lithium are concentrated to South and North America and to China. They will be enough to cover the global needs including the battery market for more than 300 years.
- The reserves of cobalt are in Africa, in Australia and in China. They will only cover the global needs including the battery market for a period of about ten years and consequently the battery technology must rely on other metals.
- The reserves of nickel and manganese are more wide distributed compared to lithium and cobalt. The known reserves will cover the global needs including the battery market for a period of about 100 respectively more than 200 years.
- The incomplete recovery of metals will increase their turn-over in environment. In spite of this no negative consequences on the human health and on the environment are apprehended. The explanation is that extra metal burdens not will increase the concentrations to the conservative levels set to protect the environment.
- The production of batteries will lead to emissions of CO₂. Supposed that the electricity for charging the batteries corresponds to the Swedish mix of electricity the climate burden of the batteries correspond to driving about 12 100 kilometers. For hybrid cars this limit is only about 2 000 kilometers.
- No restrictions in the use of crystalline graphite or organic solvents have been found as necessary.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Mål för denna studie	2
3	Litium-jonbatterier	3
3.1	För- och nackdelar med litium som elektrodmaterial	3
3.2	Litium-jonbatterier finns i många storlekar och byggs upp av många celler om de används i bilar	3
3.3	Uppbyggnad av cellerna i ett litium-jonbatteri	3
3.4	Elektriska egenskaper hos ett litium-jonbatteri	5
4	Små risker för att metallerna blir begränsande	6
4.1	Globala tillgångar på metaller för litium-jonbatterier	6
4.1.1	Litium	6
4.1.2	Kobolt	7
4.1.3	Nickel	7
4.1.4	Mangan	8
4.2	Global produktion av metaller till litium-jonbatterier	8
4.2.1	Litium	8
4.2.2	Kobolt	9
4.2.3	Nickel	9
4.2.4	Mangan	10
4.3	Behovet av metaller för litium-jonbatterier	10
4.3.1	Behovet av litium i ett långsiktigt perspektiv	11
4.3.2	Behovet av kobolt i ett långsiktigt perspektiv	11
4.3.3	Behovet av nickel i ett långsiktigt perspektiv	12
4.3.4	Behovet av mangan i ett långsiktigt perspektiv	13
5	Miljö- och hälsobedömningar	14
5.1	Relativa utsläppsförändringar av metaller	14
5.2	Metalltillskottens förväntade betydelse	14
5.2.1	Litium	14
5.2.2	Kobolt	15
5.2.3	Nickel	16
5.2.4	Mangan	16
5.3	Organiska lösningsmedel	17
5.4	Grafit	17
6	Koldioxidbelastning	18
7	Diskussion	19
8	Referenser	20

1 Inledning

Att minska biltrafikens utsläpp av koldioxid, CO₂, och av ämnen som försämrar luftkvaliteten i allmänhet framstår som allt viktigare. Inte minst gäller detta inom EU, där målet är att minska CO₂-utsläppen med mellan 20 och 30 % fram till 2020. Om inte transportsektorn medverkar till detta kommer andra sektorer att drabbas av utsläppsbegränsningar på upp till 40 %. En inblandning av cirka 10 % biodrivmedel, som är ett annat EU-mål för år 2020, kommer inte att leda till lägre absoluta utsläpp av CO₂ från landsvägstransporterna än dagsläget. Förklaringen till detta är biltrafikens snabba ökning. Att öka inblandningen av biodrivmedel till över 10 % kan knappast anses möjligt med tanke på att tillgängliga arealer globalt sett inte räcker både till detta och till att klara en större produktion av livsmedel.

Ett sätt att minska utsläppen från landsvägstransporterna är att dessa i allt högre grad sker med fordon som helt eller delvis drivs med el. Detta kräver batterier som har förmåga att lagra el för 15 – 20 mils körning om bilarna enbart drivs med el. Om körningen sker med en blandning av el och andra drivmedel (s.k. hybridbilar) kan lagringsbehovet reduceras till cirka 4 - 5 mils körning.

Energieffektiviteten för eldrivna fordon bedömdes för några år sedan vara av storleksordningen 83 %, när hänsyn tas till ledningsförluster och självurladdning av batterierna (ref 7). Till detta kommer att elbehovet för bilens AC-system kan uppskattas bli cirka 5 % av elbehovet för fordonsdriften. För bilar med Otto- eller Dieselmotorer är däremot effektiviteten ofta inte högre än cirka 20 %, om hänsyn tas till verkningsgradsförluster i distributionskedjan.

En förutsättning för att samhällsmässiga klimatvinster skall uppstå med eldrift av landsvägsfordon är att den el som behövs karaktäriseras av förhållandevis små utsläpp av CO₂. Detta kan uppnås t.ex. genom;

- Att tillskottet av el kommer från förnybara energislag eller från kärnkraft
- Att det frigörs genom effektiviseringar inom energisystemet
- Kombinationer av dessa möjligheter.

Den el som finns på den svenska marknaden uppfyller på många sätt dessa villkor och har i ett LCA-perspektiv så låg genomsnittligt CO₂-belastning som 25-30 g/kWh.

För att uppnå en hög effektivitet med eldrivna fordon får inte batterivikten vara alltför stor. Flera studier som gjorts kring eldrivna bilar pekar på att litium-jonbatterier har den största potentialen till att bli det energieffektivaste och mest miljöanpassade alternativet (ref 17). Ett alternativ till litium-jonbatterier är bränsleceller, som dock i en tidigare Elforskrapport (05:18) bedömdes som marknadsmogna i mitten av detta sekel.

2 Mål för denna studie

De mål som formulerades för denna studie har varit att beskriva:

- Tillgången på material för litium-jonbatterier och om brister kan befaras sett i perspektiv av olika marknaders behov.
- Kända miljö- och hälsorisker relaterade till de material (Li, Co, Ni, Mn, grafit och organiska lösningsmedel), som ingår i litium-jonbatterier.
- Produktion och återvinning av nyckelkomponenter till litium-jonbatterier och eventuella miljörisker kan förknippas med dessa aktiviteter.

3 Litium-jonbatterier

3.1 För- och nackdelar med litium som elektrodmaterial

Litium är den jordartsmetall som har den lägsta atomvikten och som står allra längst ut till vänster i det periodiska systemet. Därmed har den en stor negativ så kallad standard-elektrodpotential och en stor laddningskapacitet (cirka 5,2kWh/kg Li), vilket är en fördel.

Nackdelen med litium som elektrodmaterial är att;

- Litium inte kan kombineras med vattenlösliga elektrolyter utan förutsätter organiska lösningsmedel eller saltsmältor för elektrontransporten.
- De litiumjoner som bildas av elektroden är mycket lösliga i alla lösningsmedel. Därmed kan elektrodstrukturen förloras under urladdningen. Den kan därmed inte återskapas under senare uppladdning och kräver därför ett hjälpmaterial i katoduppbyggnaden. En annan nackdel är att det kan bildas utväxter av litium på elektroden, som i sin tur kan orsaka kortslutningar.

3.2 Litium-jonbatterier finns i många storlekar och byggs upp av många celler om de används i bilar

Litium-jonbatterier finns redan i småskalig tillämpning i elektronisk utrustning, men för drift av fordon krävs betydligt större batterier. Eldrivna fordon är antingen sådana som enbart drivs med en elmotor eller sådana där driften sker med en kombination av elmotor och förbränningsmotor – så kallade plug-in hybridfordon. Den energimängd som batteriet måste innehålla i det första fallet är självklart mycket större än i det senare fallet. Ett fordon för huvudsaklig eldrift måste därför innehålla ett väsentligt större batteri och mer material än i det andra fallet.

För att få tillräckligt med energi inlagrat i ett batteri för fordonsdrift måste flera celler kombineras. För exempelvis Nissan Altra innehåller batteriet inte mindre än 96 celler med en totalvikt av 364 kg och har en lagrad energimängd om 62 kWh. Av vikten svarar cellerna i detta fall för 87 % medan strömkretsar och batterihölje svarar för 13 %. Den totala dimensionen på batteriet är 1*2*0,18 m.

3.3 Uppbyggnad av cellerna i ett litium-jonbatteri

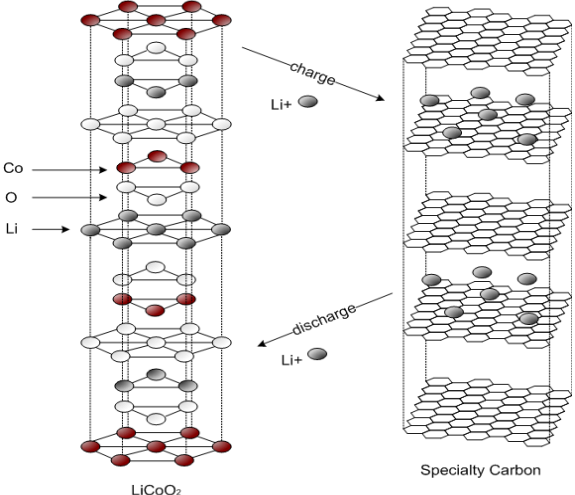
Cellerna i ett litium-jonbatteri är, oberoende av batteriets användningsområde, uppbyggda av tunna skikt som hittills rullats till cylinderform. För fordonsdrift provas nu att gå över till prismatiska batterier. Huvudkomponenterna i cellerna är:

- En negativ elektrod (katoden) som hittills ofta varit gjord av litium-koboltoxid. Som alternativ till kobolt används nickel (Ni) eller mangan

(Mn). Ett nyligen framtaget alternativ till nämnda metaller är LiFePO_4 , som dock anses ha principiella nackdelar i form av bland annat lägre ledningsförmåga och lägre arbetsspänning. Därför har man länge varit osäker på om och när detta katodmaterial får någon kommersiell användning (ref 8). I litteraturen har dock under senare tid funnits artiklar av mer kommenterande form, där det hävdats att dessa nackdelar övervunnits. Ett annat lovande och nytt katodmaterial är litiumjärnsilikat $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. Det anses ha potential både till att ge billigare batterier och att få en stor lagringskapacitet.

- En positiv elektrod (anoden) som är gjord av kristallin grafit, vanligen lagd på en tunn kopparfolie. Då grafit finns i närmast obegränsade mängder är tillgången på anodmaterial knappast en kritisk fråga.
- En organisk elektrolyt som innehåller ett litiumsalt som LiBCl_4O_8 , LiPF_6 eller $\text{Li}[\text{PF}_3(\text{C}_2\text{F}_5)_3]$. Vanligen är elektrolyten en gel som kan bestå av propylkarbonat, etylkarbonat, dietylkarbonat, dimetylkarbonat eller dimetoxyetan.
- Ett skikt som separerar katoden från anoden.

De reaktioner som sker vid laddning respektive urladdning av en cell med kobolt som katodmaterial visas i Figur 1.

Katod	Anod	Reaktioner
 The diagram illustrates the internal structure of a Li-ion battery. On the left is the cathode, labeled LiCoO_2, with layers of Cobalt (Co), Oxygen (O), and Lithium (Li) ions. On the right is the anode, labeled Specialty Carbon, represented by stacked hexagonal layers. Arrows indicate the movement of Li^+ ions: during charging, ions move from the cathode to the anode; during discharging, they move from the anode back to the cathode.		
Vid battericellens laddning sker följande reaktion när kobolt ingår i katoden $\text{LiCoO}_2 + \text{C}_6 \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + \text{C}_6\text{Li}_x$ medan urladdningen innebär det omvända; d.v.s. $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + \text{C}_6\text{Li}_x \leftarrow \text{LiCoO}_2 + \text{C}_6$		

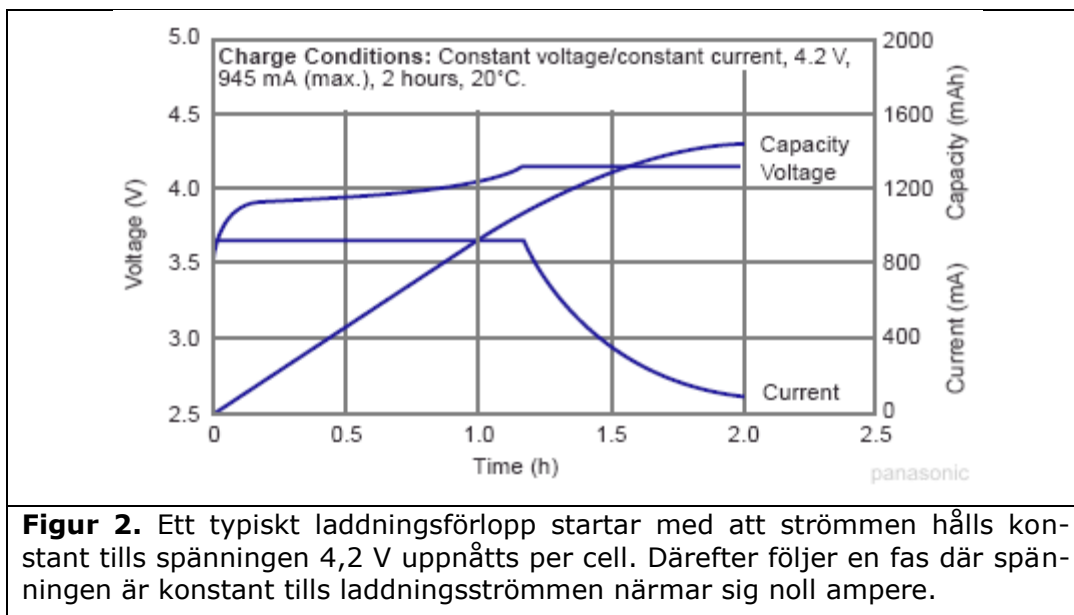
Figur 1. Principiell uppbyggnad av ett Li-jonbatteri samt reaktionerna vid laddning och urladdning. Vid laddning joniseras således litium i katoden och fördelar sig i anodens grafitstruktur, medan litiumjoner vandrar från anoden till katoden under urladdning.

3.4 Elektriska egenskaper hos ett litium-jonbatteri

Typiska elektriska egenskaper för ett litium-jonbatteri är:

- En förhållandevis hög cellspänning. I normalfallet är den 3,6 V, men för nyare batterier har ända upp till 3,7 V uppmätts.
- Inga minnes effekter vilket innebär att ett batteri kan laddas vid godtyckligt tillfälle.
- Hög laddningsström (0,5 – 1 A) vilket innebär att så korta tider som 2 timmar är möjliga för att uppnå full laddning. Detta framgår av Figur 2, som också visar att cirka 65 % laddning kan åstadkommas redan inom 15 minuter. Vid lägre temperatur förlängs dock laddningstiden.
- Vid urladdning hålls spänningen närmast konstant.

Ett typiskt laddningsförlopp är att strömstyrkan först hålls konstant tills spänningen mellan anod och katod uppgår till 4,2 V/cell. Därefter sker laddningen vid konstant spänning (4,2 V) tills laddningsströmmen närmar sig noll ampere. Detta illustreras i Figur 2.



Batteriets kapacitet minskar dock med tiden oberoende av om det används eller inte. Ju varmare batteriet förvaras desto större blir kapacitetsförlusten.

4 Små risker för att metallerna blir begränsande

Av föregående avsnitt har framgått att väsentliga element i uppbyggnaden av litium-jonbatterier är katodmaterialen kobolt, nickel eller mangan vid sidan av litium. I detta kapitel redovisas:

1. De globala tillgångarna på nämnda metaller.
2. Metallernas nuvarande användning
3. Metallbehoven när litium-jonbatterier införs i stor skala för drift av landsvägsfordon. På längre sikt är det tänkbart att olika järnföreningar kan bli ett alternativ till kobolt, nickel och mangan. Några tillgångsbegränsningar finns knappast för järn, varför det inte finns något behov av att beskriva det på samma sätt som för de andra katodmaterialen.

I uppbyggnaden av litium-jonbatterier ingår också grafit, som är en kristallin form av kol. Därmed behöver man i praktisk mening inte räkna med att anodmaterialet blir begränsande för användningen av litium-jonbatterier. Inte heller behöver man befara detta för de organiska lösningsmedlen, som kan produceras såväl ur fossila bränslen som ur biomassa.

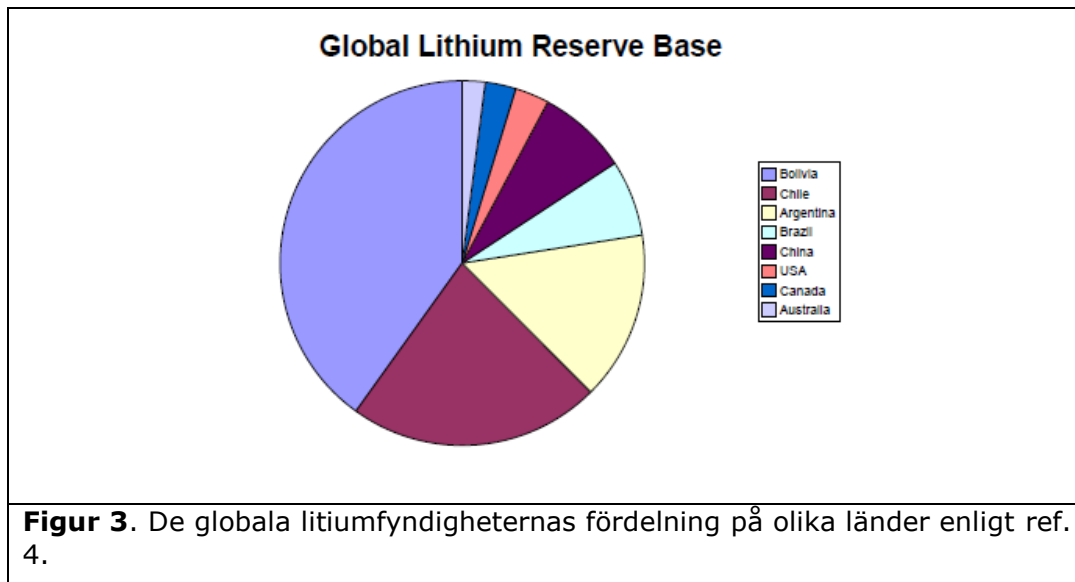
4.1 Globala tillgångar på metaller för litium-jonbatterier

4.1.1 Litium

Litium förekommer dels i form av mineralet pegmatit, dels i form av fasta och flytande saltavlagringar i saltsjöar och i akvifärer. Många bedömare anser att det ännu är alldeles för tidigt att göra några uppskattningar av de globala tillgångarna, då något behov av att påträffa nya fyndigheter knappast funnits. I en genomgång som gjorts så sent som under år 2008 (ref 4) lämnas dock följande data:

- De globala reserverna bedöms vara cirka 30 miljoner ton, varav 50 % redan är kända. Av kända tillgångar finns drygt 75 % i västvärlden exklusive Afrika. De globala fyndigheternas fördelning på olika länder redovisas i Figur 3.
- Pegmatit finns i många länder (Australien, Finland, Kanada, Kina, Ryssland, USA, Zaire, Zimbabwe och Österrike). Totalt anses dessa fyndigheter motsvara 7,6 miljoner ton litium. Utvinning av litium från pegmatit har tidigare ansetts vara alltför kostsamt och mineralet har därför hittills haft sin huvudsakliga användning för färgning av glas och keramiskt gods. Med stigande priser på litium hålls det för troligt att lakning med svavelsyra och en efterföljande omvandling till litiumkarbonat kan bli en lönsam produktionsväg.

- Vattenlösliga salter och saltavlagringar har bedömts innehålla närmare 22 miljoner ton litium. De största kända fyndigheterna finns i Bolivia (5,5 miljoner ton), i Chile (6,9 miljoner ton), i Argentina (2,7 miljoner ton) och i Kina (2,6 miljoner ton).



Den ovan citerade referensen har stark ifrågasatts av en fransk forskningsgrupp (ref 19) som hävdar att de fyndigheter som lämpar sig för produktion av litium-jonbatterier enbart uppgår till 4 miljoner ton. Den franska rapporten utgår dock från ett statiskt ekonomiskt perspektiv och beaktar endast de fyndigheter som idag kan användas för att producera litium till batterier.

4.1.2 Kobolt

Kobolt förekommer endast i tämligen låga halter i jordskorpan och utvinns som biprodukt från annan metalltillverkning - främst nickel och koppar men även vid silver- och arsenikutvinning. Endast ett fåtal uppgifter om jordens totala tillgångar har påträffats i litteraturen. En av de säkraste källorna är U.S. Geological Survey, som både år 2009 och 2008 uppger att de kända globala tillgångarna är cirka 15 miljoner ton. De största av dessa finns i Afrika och då särskilt i Kongo och Zambia, i Kina, i Kuba, i Australien och i USA. Hypotetiskt bedömer U.S. Geological Survey att det kan finnas 1 miljard ton kobolt i manganrika malmkroppar samt på havsbottnar.

4.1.3 Nickel

År 2002 uppgavs (ref 11) att de då kända nickelfyndigheterna uppgick till 194 miljoner ton. År 2009 uppger U.S. Geological Survey att de kända tillgångarna av nickel, med mer än 1 % nickel i malmen, är cirka 220 miljoner ton. Det får därför hållas troligt att den globala tillgången på nickel minst uppgår till den senare uppgiften. De största kända fyndigheterna finns i Australien, i Brasilien

en, i Indonesien, i Kuba, i Kanada, i Nya Kaledonien, i Ryssland och i Sydafrika.

4.1.4 Mangan

U.S. Geological Survey uppger år 2008 att de kända tillgångarna av mangan är cirka 5200 miljoner ton. De utan tvekan största fyndigheterna finns i Sydafrika, som har cirka 80 % av de globala fyndigheterna. I Ukraina, där de näst största fyndigheterna påträffats, återfinns cirka 10 % av de globala reserverna.

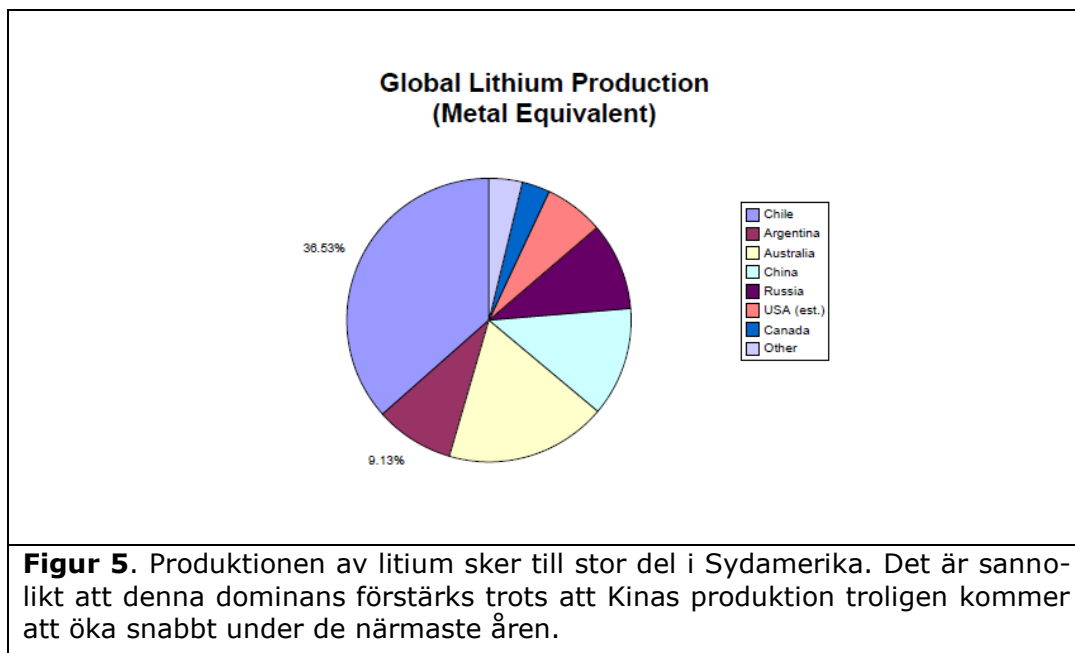
4.2 Global produktion av metaller till litium-jonbatterier

4.2.1 Litium

Världsproduktionen av litium stiger snabbt. Den uppgick år 2000 till 13 000 ton/år (ref 13) och för att år 2006 vara cirka 20 000 ton/år. Fram till år 2011 ansåg samma källa att den globala produktionen av litium i stort skulle vara oförändrad för att därefter stiga i takt med att litium-jonbatterier utvecklas för fordonsdrift.

Den största produktionen av litium sker idag i Chile följt av Argentina – i båda fallen från salt/saltlösningar. Även i Nevada tillverkas litium från salter och inom kort beräknas att Bolivia också nå en hög produktion på samma sätt. I Kina var produktionen år 2008 sannolikt 3 800 ton. Från och med år 2010 anses det troligt att Kina kan ha en produktion av 11 300 ton per år.

I Figur 5 redovisas de länder som idag har den största produktionen av litium.



4.2.2 Kobolt

Produktionen av kobolt har stigit snabbt under 2000-talet. År 2001 var produktionen knappt 40 000 ton/år för att under år 2007 ha stigit till cirka 50 000 ton/år. Den största användningen av kobolt är i batteritillverkning (25 %), i legeringar (22 %) och i hårdmetaller (12 %). Produktion av kobolt sker i samtliga världsdelar enligt Cobalt Development Institute, som för år 2007 anger de data som återfinns i Tabell 1.

Tabell 1. Produktionen av kobolt var år 2007 cirka 50 000 ton/år med nedanstående fördelning på olika länder.		
Världsdel/land	Produktion ton/år	Ursprung på råvara
Europa		
Belgien	2900	Återvinning, Australien, Kongo
Finland	9100	Nya Kaledonien, Afrika, Australien
Frankrike	300	Nya Kaledonien, biprodukt från Ni
Norge	4000	Afrika, Australien, Kanada, Ryssland
Ryssland exp.	3600	Inhemsk
Afrika		
Marocko	1600	Inhemsk
Sydafrika	250	Inhemsk
Kongo	600	Inhemsk
Uganda	700	Inhemsk
Zambia	4400	Inhemsk
Amerika		
Brasilien	1150	Inhemsk
Kanada	5650	Inhemsk, Australien, Kuba, återvinning
Asien		
Indien	1000	Inhemsk, Kongo, Kuba
Japan	1100	Australien, Filippinerna
Kina	13250	Inhemsk, Kongo
Australien	3700	Inhemsk, Nya Kaledonien

4.2.3 Nickel

Den globala nyproduktionen av nickel var år 2006 1,36 miljoner ton, år 2007 1,47 miljoner ton och förutsågs för år 2008 uppgå till 1,57 miljoner ton. De marknadsbedömningar som redovisas i litteraturen pekar på att förbrukningen år 2014 kan uppgå till 2,5 miljoner ton/år (ref 3)

Mer än 60 % av världsproduktionen av nickel används till rostfria stål. Nickelbaserade legeringar och nickelbelagda ytor svarar tillsammans för närmare 30 % av den globala konsumtionen och järn- och kopparbruk för ytterligare 5 %. Användningen av nickel i olika batterier spelar således än så länge en underordnad roll.

Återvinning av nickel ur exempelvis rostfria stål är en process som är under utveckling. I USA uppgick nickelåtervinningen under år 2008 till drygt 35 % av nyproduktionen.

4.2.4 Mangan

Den globala produktionen av mangan uppgår till cirka 31,2 miljoner ton/år. De största producentländerna är Kina (6 miljoner ton/år), Sydafrika (5,2 miljoner ton/år), Australien (4,6 miljoner ton/år), Brasilien (3,1 miljoner ton/år), Gabon (3 miljoner ton/år), Kazakstan (2,2 miljoner ton/år) samt Indien och Ukraina (vardera ca 2 miljoner ton/år).

Återvinning av mangan uppges av flera källor vara närmast försumbar och användningen baseras därför uteslutande på produktion av mangan. Av det mangan som utvinns används cirka 94 % för tillverkning av legeringsmaterial.

4.3 Behovet av metaller för litium-jonbatterier

Behovet av metaller för litium-jonbatterier är starkt beroende av hur marknaden för eldrivna fordon utvecklas. Något förenklat kan man säga att metallbehovet för batterier till så kallade plug-in hybrider är cirka 5 % av behovet för batterier som används i bilar med ren eldrift (ref 5).

I en svensk studie (ref 15) har uppskattningar gjorts över metallbehoven i litium-jonbatterier för personbilar med ren eldrift. Bilarna förutsätts i en första generation kunna köras cirka 160 km på en batteriladdning och på sikt cirka 210 km. De data som anges i den nämnda studien är återgivna i Tabell 2.

Tabell 2. Behov av metaller för nyproduktion av ett batteri för en personbil i ren eldrift enligt ref 15.								
Hjälpkatod	Kg litium		Kg kobolt		Kg nickel		Kg mangan	
	Nuläge	Framtid	Nuläge	Framtid	Nuläge	Framtid	Nuläge	Framtid
Co	2,4-3,8	1,9-3,9	20-32	16-33				
Mn	2,4-3,8	1,4-3,0						~ 60
Ni	2,5-4,0	1,7-3,6			21-34	14-30		

Vid återvinning av litium-jonbatterier uppges av batteritillverkaren Saft (ref 18) att 70 % av batteriernas metallinnehåll kan återanvändas.

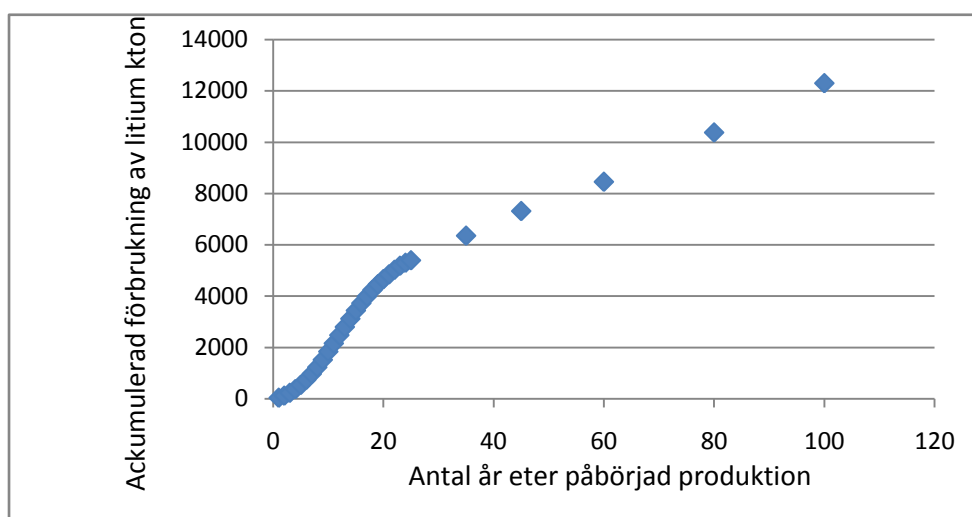
För att bedöma hur länge de olika globala metallfyndigheterna kan räcka har det i denna studie utgått från att:

- Bilproduktionen i världen under mitten av detta decennium uppgick till cirka 90 miljoner bilar per år. I en optimistisk framtid är det möjligt att bilproduktionen skulle kunna uppgå till 150 miljoner bilar per år. Av dessa har det här förutsatts att el- och hybridbilar första året har en marknadsandel på 10 % för att på 10 års tid ha 100 % av marknaden.
- Återvinning av material från uttjänta litium-jonbatterier kommer igång cirka 15 år efter det att en större produktion inletts.

- Andelen bilar som drivs enbart med el blir så stor som 2/3-delar medan plug-in hybriderna svarar för 1/3-del.

4.3.1 Behovet av litium i ett långsiktigt perspektiv

I en försiktig beräkning kan man enligt punkt 4.3 utgå från att litiumbehovet i genomsnitt är av storleksordningen 2,2 kg per batteri under de första 15 åren för att därefter sjunka till 0,66 i takt med återvinningen. Det globala behovet av litium för andra ändamål antas även fortsättningsvis vara 20 000 ton per år varav 70 % på 15 års sikt återvinns. Hur den ackumulerade förlusten av litium utvecklas under de närmaste 100 åren med de gjorda antagandena illustreras i Figur 6. Slutsatsen av de här gjorda beräkningarna är att nu kända tillgångar av litium räcker i cirka 300 år.



Figur 6 Efter 100 år med litium-jonbatterier för bildrift har cirka 12 miljoner ton litium förbrukats. De kvarvarande kända reserverna kan beräknas räcka i ytterligare 200 år med här gjorda antaganden.

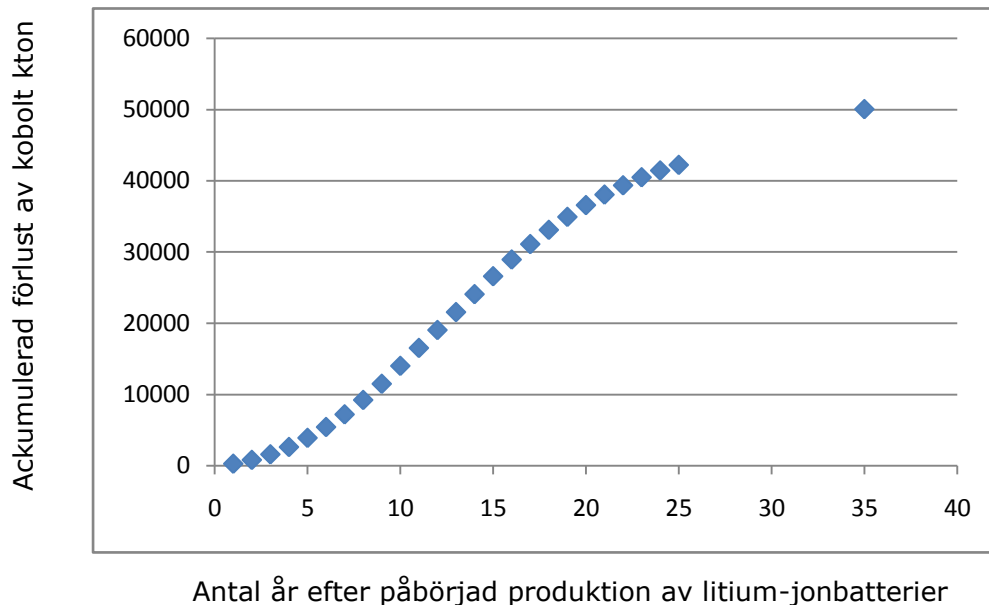
Av de litiumförluster som beräknas uppkomma under 100 år svarar litium-jonbatterier, som används i bilar, för cirka 95 %.

4.3.2 Behovet av kobolt i ett långsiktigt perspektiv

I en försiktig beräkning kan man enligt punkt 4.3 utgå från att koboltbehovet i genomsnitt är av storleksordningen 16,5 kg per batteri under de första 15 åren för att därefter sjunka till 5 kg per batteri i takt med återvinningen. Det globala behovet av kobolt för andra ändamål antas även fortsättningsvis vara 40 000 ton per år. Hur den hypotetiskt beräknade ackumulerade förlusten av kobolt utvecklas under de närmaste 100 åren med de gjorda antagandena illustreras i Figur 7. Slutsatsen av de här gjorda beräkningarna är att de nu kända tillgångarna endast räcker i drygt 10 år. Skulle däremot kobolt finnas i

manganrika malmkroppar och på havsbottnar i de mängder som det spekuleras i från U.S Geological Survey blir inte kobolt en bristvara ens på lång sikt. Innan dessa hypotetiska fyndigheter börjar utnyttjas är det dock troligt att det uppkommer en brist på kobolt.

Av de koboltförluster som beräknas uppkomma under 10 år svarar litium-jonbatterier, som används i bilar, för mer än 95 %.

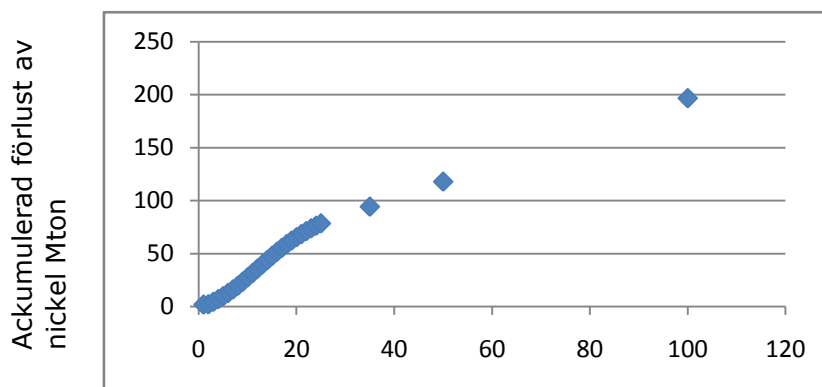


Figur 7 De nu kända reserverna av kobolt kommer bara att räcka i drygt 10 år för tillverkning av litium-jonbatterier för bilar. Annan industriell användning av kobolt har jämförelsevis liten påverkan på denna slutsats.

4.3.3 Behovet av nickel i ett långsiktigt perspektiv

I en försiktig beräkning kan man enligt punkt 4.3 utgå från att nickelbehovet i genomsnitt är av storleksordningen 17,1 kg per batteri under de första 15 åren för att därefter sjunka till 5 kg per batteri i takt återvinningen. Det globala behovet av nickel för andra ändamål antas även fortsättningsvis vara 2,5 miljoner ton per år. Härav antas att 40 % kommer att återvinnas redan vid den tidpunkt då litium-jonbatterier börjar tillverkas. Hur den ackumulerade globala förlusten av nickel utvecklas under de närmaste 100 åren med de gjorda antagandena illustreras i figur 8. Slutsatsen av de här gjorda beräkningarna är att de nu kända nickeltillgångarna räcker i cirka 100 år.

Av de nickelförluster som beräknas uppkomma under 100 år svarar litium-jonbatterier, som används i bilar, för cirka 25 %.



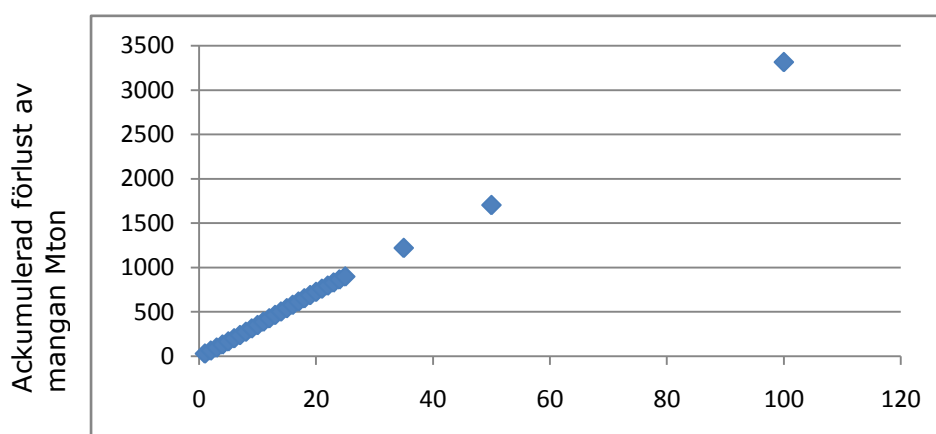
Antal år efter påbörjad produktion av litium-jonbatterier

Figur 8 Beräknad ackumulerad global förlusten av nickel under de närmaste 100 åren.

4.3.4 Behovet av mangan i ett långsiktigt perspektiv

I en försiktig beräkning kan man enligt punkt 4.3 utgå från att manganbehovet i genomsnitt är av storleksordningen 40 kg per batteri under de första 15 åren för att därefter sjunka till 12 kg per batteri när återvinningen kommit igång. Det globala behovet av mangan för andra ändamål antas även fortsättningsvis vara 32 miljoner ton per år. Hur den ackumulerade globala förlusten av mangan utvecklas under de närmaste 100 åren med de gjorda antagandena illustreras i Figur 9. Slutsatsen av de här gjorda beräkningarna är att de nu kända mangantillgångarna räcker i cirka 200 år.

Av de manganförluster som beräknas uppkomma under 100 år svarar Li-jonbatterier, som används i bilar, för cirka 3,5 %.



Antal år efter påbörjad produktion av litium-jonbatterier

Figur 9 De kända tillgångarna av mangan räcker i flera århundraden och blir ingen bristvara för litium-jonbatterier.

5 Miljö- och hälsobedömningar

De metaller som ingår i litium-jonbatterier (Li, Co, Ni och Mn) är allmänt spridda i jordskorpan. Utsläppen från ofullständig återanvändning kommer också att bli spridda globalt. Ett sätt att bedöma den storskaliga påverkan som de icke återvunna metallerna får på biosfären är att sätta dessa i relation till de:

- Flöden som uppkommer genom vittring och från förbränning av fossila bränslen.
- Naturliga haltvariationer av metallerna i jord, vatten och luft

Här har detta gjorts för en period på hundra år (med undantag för kobolt, där nu kända fyndigheter bara beräknats räcka i cirka 10 år).

5.1 Relativa utsläppsförändringar av metaller

Den vittring som sker av jordskorpan leder till att metaller frigörs till akvatiska miljöer. Från vulkanisk aktivitet sker utsläpp till atmosfären liksom från förbränning av främst fossila bränslen. Dessa flöden har varit föremål för många studier och är därmed relativt väl dokumenterade (ref 16). För metallerna Li, Co, Ni och Mn uppges i nämnda källa de värden som ingår i tabell 3. I tabell 3 har också medtagits andra antropogena metallflöden såsom de redovisats i kapitel 4.

Tabell 3. Flöden av aktuella metaller från naturliga och antropogena källor						
Metall Tidsperiod	Flöden under angiven tidsperiod Mton				Li-jon- batterier	Ökning relativt na- turliga flöden och förbränning %
	Naturligt	Fossilt	Annat antropent	Σ		
Litium, 100 år	36	22	0,6	59	11,7	20
Kobolt, 10 år	5,4	0,7	0,4	6,5	13,6	210
Nickel, 100 år	30	57	150	237	47	20
Mangan, 100 år	55	17	3200	~3270	113	3,5
	Naturligt = vittring + vulkanism					

5.2 Metalltillskottens förväntade betydelse

5.2.1 Litium

Den akuta toxiciteten av litium i akvatisk miljö är låg (ref 12) och en halthöjning på mer än 1000 gånger vattnens naturliga halter måste uppnås innan några skadliga effekter uppstår på känsliga testorganismer.

Dödliga effekter av litium hos människan kan uppkomma vid kroppshalter på 526-840 mg/kg (ref 12) kroppsvikt, vilket motsvarar 30 – 50 g per normalindiv. Förgiftningssymtom kan dock noteras redan vid 1 g per kg kroppsvikt.

Detta kan ställas mot att 7 mg litium anges som ett normal värde per individ (ref 9). Detta innebär att intaget av litium skulle kunna få öka åtminstone 100 gånger över dagens nivå innan negativa hälsoeffekter uppkommer.

De relativa haltförändringar av litium i luft, vatten och mark som enligt punkt 5.1 kan uppkomma från litium-jonbatterier kan därmed inte få någon miljö- eller hälsomässig negativ effekt.

5.2.2 Kobolt

I (ref 2) görs en mycket omfattande genomgång av tillgänglig litteratur om miljö och hälsoeffekter av kobolt och är en grund för det som nedan sägs.

Halterna av kobolt i yt- och grundvatten är normalt låga och vanligen lägre än 1 µg/l i glest befolkade områden och mellan 1 och 10 µg/l i tätbefolkade områden. Nära områden där kobolt utvinns liksom i jordbrukslandskap kan halten vara så hög som flera hundra µg/l. I havsvatten är halten generellt sett lägre än 1 µg/l och i dricksvatten mellan 1 och 2 µg/l.

Den halt vid vilken 50 % av känsliga vattenlevande organismer överlevde 21 dygns exponering rapporteras vara 30 – 50 µg/l. För känsliga sötvattensfiskar överlevde 50 % 16 dygns exponering vid en halt av 60 µg/l. Havslevande fiskar visade sig däremot betydligt motståndskraftigare.

Det är i miljösammanhang vanligt att tillämpa en tiofaldig säkerhet när riskbedömningar görs. Utgående från ovan citerade data skulle därmed en säkerhetsgräns sättas så låg som cirka 3 µg/l för att skydda den akvatiska miljön i opåverkade områden. I den ovan angivna referensen anses dock att 8 µg/l i sötvattenmiljöer är en tillräcklig säkerhetsgräns. Den extra koboltexponering som användningen av litium-jonbatterier skulle kunna leda till borde därmed inte leda till några storskaliga negativa konsekvenser för den akvatiska miljön.

Kunskapen om vilka effekter kobolt kan ha på mikroorganismer och ryggradslösa djur i jorden är mycket begränsad. När det gäller fåglar anger ovanstående litteraturreferens att det är mycket osannolikt att några negativa effekter skulle uppkomma och att ett kobolttillskott snarare kan vara något positivt.

Kobolt ingår som en del i vitamin B-12 och ett visst dagligt intag via födan är därför väsentligt. Kobolt har också använts som ett medel att bota blodbrist. Normalt dagligt intag av kobolt är 5 -40 µg/dygn per person. I den ovan angivna litteraturreferensen uppges att ett dagligt intag av 40 000 µg vattenlöslig kobolt per dygn och person under 22 dygn gav en onormal ökning av röda blodkroppar hos sex försökspersoner. En annan uppgift är att ett flerårigt intag av 2400 – 8000 µg kobolt per dygn, inblandat i öl, ledde till dödlig utgång. En slutsats av detta är att den relativa förändring av koboltintag som allmänheten kan utsättas för på grund av användningen av litium-jonbatterier måste vara försumbar när det gäller negativa hälsoeffekter.

5.2.3 Nickel

I en översikt över Ni-halter i omgivningsmiljön uppges (ref 1) att halten nickel i dricksvatten normalt är lägre än 10 µg/l. I ett industriellt högpåverkat område i Polen var dock medelvärdet så högt som 17 µg/l. I allvarligt försurade områden rapporteras av WHO så höga halter som 980 µg/l. För sötvattenmiljöer uppges (ref 14) att nickelhalten normalt ligger i intervallet 2 till 10 µg/l medan halten i marin miljö är lägre och i intervallet 0,2 till 0,7 µg/l.

Den senare referensen anger att den halt vid vilken 50 % av känsliga vattenorganismer överlever under 4 dygn i två olika försök var 500 respektive 200 µg/l. För fisk som exponeras under en tid på 4 dygn är motsvarande värde så högt som 4 000 till 20 000 µg/l. För regnbåge noterades inga negativa effekter i sötvattenmiljöer om halten högst uppgick till 50 µg/l.

Maskar och andra jordlevande organismer är enligt ovanstående källa förhållandevis okänsliga för markens nickelinnehåll.

Inatag av nickel via kosten har visats vara nödvändigt för flera djurarter liksom för människan. Bristtillstånd har dock inte påvisats för människan. Ett normalt innehåll av nickel är cirka 10 mg per person. Det största intaget sker genom födan och är normalt av storleksordningen < 0,2 – 0,23 mg/d och person medan intaget från vatten bara är 10-delen så stort. Djurexperiment har visat på att mångfalt större intag (5 – 50 mg/kg kroppsvikt och dygn) kan ske med vatten och annan föda innan negativa effekter uppkommer.

Inandning av damm med högt nickelinnehåll kan enligt WHO orsaka lungcancer och tumörer i andningsvägarna.

Med tanke på att litium-jonbatterier inte ökar spridningen av nickel med mer än cirka 20 % kan man av ovan redovisade erfarenheter dra slutsatsen att denna extra nickelbelastning varken äventyrar miljön eller människans hälsa.

5.2.4 Mangan

Mangan förekommer vanligt i jordskorpan, men halterna varierar inom så vida gränser som mellan 50 och 10 000 ppm. Som ett svenskt medianvärde för jordbruksmark anges i en rapport från KI (ref 10) 550 ppm.

I ren utomhusluft är manganhalten cirka 7 ng/m³ och i måttligt påverkad luft mellan 10 och 30 ng/m³. I industriella områden med produktion av stål kan halterna däremot vara så höga som 220-300 ng/m³.

I havsvatten är manganhalten i regel låg ~ 2 µg/l medan den i sjöar och vattendrag kan variera mellan 1 och 200 µg/l. I Sverige är haltvariationerna i sjöar så stora som mellan <0,2 till 550 µg/l.

Det svenska riktvärdet för mangan i dricksvatten är 300 µg/l medan WHO: s riktvärde är 400 µg/l. Av 19 000 brunnar som undersökts i Sverige hade 85 % lägre manganhalt än det svenska riktvärdet och 90 % lägre än WHO: s. Den lägsta manganhalt i dricksvatten som rapporterats ge medicinsk effekt är däremot så hög som 2 000 µg/l.

De förhållandevis små tillskott som kan komma från användningen av Li-jonbatterier (här beräknade till 3,5 %) får mot ovanstående bakgrund anses ha en försumbar miljöpåverkan.

5.3 Organiska lösningsmedel

De organiska lösningsmedel som används i Li-jonbatterier är ofullständigt undersökta när det gäller miljöeffekter. Dock finns det i kemiska databaser, exempelvis ICSC, information om vad man skall iaktta för att förhindra negativa hälsoeffekter samt för att undvika eldsvådor.

5.4 Grafit

Anoden i ett litium-jonbatteri är som tidigare omtalats uppbyggd av kristallin grafit. Olika former av grafit används sedan mycket lång tid inom industrin utan att negativa hälso- och miljöeffekter noterats – möjligen med undantag för grafit som används inom nanoteknologin. Någon anledning att befara negativa hälso- och miljöeffekter från grafit som används i litium-jonbatterier finns därför knappast.

6 Koldioxidbelastning

I litteraturen har ett fåtal data påträffats som berör produktion av metaller och vilka CO₂-utsläpp som kan hänföras till detta. När det gäller uppgifter för hela batterier har endast en litteraturreferens (ref 6) kunnat hittas. En anledning till den bristande informationen kan vara att teknologin med litiumjonbatterier är under snabb utveckling och att kompletta livscykelanalyser är tidsödande och att de därför inte hinner med den tekniska utvecklingen.

I den ovan angivna referensen anges att CO₂-belastningen är cirka 75 kg CO₂/lagrad kWh el för batterier med nickel eller kobolt som hjälpkatod. Motsvarande siffra för mangan som hjälpkatod är cirka 77 kg CO₂. Genom materialåtervinning bedöms att närmare 40 % av CO₂-belastningen kan undvikas.

Om en bil som enbart drivs med el skall kunna köras 200 km på en laddning krävs en inladdad energimängd på cirka 30 kWh och därmed en i batteriet inbyggd CO₂-belastning på 1350 kg givet att materialet återvinns, när batteriet inte längre används. För plug-in hybridfordon kan man räkna med att den i batteriet lagrade energimängden bara är cirka 5 kWh, vilket motsvarar en CO₂-belastning på 225kg.

El, som genereras i Sverige, motsvarar i ett LCA-perspektiv en CO₂-belastning på 37 g/kWh. Utgående från att energieffektiviteten för eldrivna fordon är 83 % (ref 5) innebär detta att CO₂-belastningen är 45 g per kWh som laddas in i batteriet. California Cars Initiative uppgav 2005 att elbehovet var 0,16 kWh/km för medelstora personbilar och 0,19 kWh/km för större fordon. Dessa uppgifter baseras på studier av Electric Power Research Institute, EPRI. Här har av försiktighetsskäl den högre siffran använts.

En modern personbil som skall uppfylla EU:s kommande miljökrav tillåts ha utsläpp på högst 120 g CO₂ per kilometer. Detta innebär att batteriets CO₂-belastning har återvunnits efter 1210 mils körning i ren eldrift. För ett plug-in fordon är motsvarande siffra 200 mils eldrift. Därmed kan man för båda fallen anse att batteriets CO₂-belastning närmast är försumbar i förhållande till de klimatvinster som uppstår under fordonets livslängd.

Om CO₂-jämförelsen i stället görs med dagens personbilar, vars genomsnittliga emission är 170 g/km skulle intjäningssträckorna i stället vara 840 respektive 140 mil.

7 Diskussion

De värderingar som gjorts i denna studie kring litium-jonbatterier kan inte finna några miljömässiga skäl som talar mot att litium-jonbatterier skall få en närmast dominerande roll som energilager för drift av personbilar. De analyser som här gjorts tyder också på att litium-jonbatterier skulle kunna få en bred marknadsintroduktion om cirka fem år.

Av de material, som ingår i uppbyggnaden av litium-jonbatterier, intar litium en nyckelroll. Den kan till skillnad mot hjälpkatodmaterialen inte ersättas med andra metaller.

Litium tillverkas idag från litiumtillgångar i saltavlagringar och saltsjöar. I dessa finns cirka 70 % av de idag kända litiumreserverna, som återfinns i Bolivia, Chile, Argentina och Kina. Dessa reserver skulle kunna räcka till mer än 1000 års användning av litium förutsatt dagens användning. Utvecklingen mot litium-jonbatterier innebär dock att de inte skulle räcka mer än cirka 200 år.

Det finns en oro för att de länder som äger litiumtillgångarna kan bilda en kartell liknande OPEC och därmed kunna styra marknaden. Detta kan på kort sikt få konsekvenser men knappast i ett längre perspektiv. För detta ställningstagande talar att:

1. Mineralet pegmatit, som finns i många andra länder, kan utnyttjas för produktion av litium.
2. Reserverna av litium kan vara betydligt större än de som idag är kända. För detta talar att det knappast tidigare har funnits någon anledning till att söka nya fyndigheter, då de kända tillgångarna kunnat täcka marknaden i ett 1000-årigt perspektiv.

8 Referenser

- Ref 1. Cempel M., Nikel G. Polish J of Environ. Stud. Vol 15 no 3
- Ref 2. CICADS 69 , 2006
- Ref 3. Electronics www.electronics.ca
- Ref 4. Evans K Lithium Corporation of America
- Ref 5. Gaines Linda, Cuenca Roy, Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles, Argonne National Laboratory, 2000.
- Ref 6. Ishihara Kaoru et.al. Environmental Burdens of Large lithium-Ion Batteries Developed in Japan; www.electrochem.org
- Ref 7. Kågesson Per Plug-in som partiell lösning av personbilars energitillförsel 2006-11-23. Uppdrag BilSweden
- Ref 8. Kumar Arjan, THAPA, Saga University
- Ref 9. Lenntech 2009
- Ref 10. Ljung K, Vahter M, Berglund M Manganese in drinking water, IMM-rapport nr 1/2007
- Ref.11 Metals Economics Group's Minesearch
- Ref 12. Miljøstyrelsen Danmark, Ecotoxicology and Environmental Safety 70 (2008)
- Ref 13. Miller David Minor Metals Conference, 2007
- Ref 14. Pillet Monique Nickel Risk Assessment, Geologian Tutkimuskeskus/Erac
- Ref 15. Råde Ingrid, Andersson Björn, Requirements for Metals of Electric Vehicle Batteries, J Power Sources 93 (2001) sid. 55-71
- Ref 16. Rydh Carl johan Environmental Assessment of Battery Systems. Doktorsavhandling Chalmers 205
- Ref 17. Rydh Carl Johan, Sandén Björn Energy Analysis of Batteries in photovoltaic systems, Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies
- Ref 18. Saft, www.saftbatteries.com
- Ref 19. Tahil William Meridian International Research, 2008