



Kriittiset metallit vihreässä energia- teknologiassa

Leena Grandell



VTT TECHNOLOGY 162

Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa

Leena Grandell



ISBN 978-951-38-8137-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 2242-122X (URL: <http://www.vt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2014

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT
PL 1000 (Tekniikantie 4, Espoo)
02044 VTT
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT
PB 1000 (Teknikvägen 4, Esbo)
FI-2044 VTT
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4, Espoo)
FI-02044 VTT, Finland
Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa

Critical metals in clean energy technology. **Leena Grandell**.
Espoo 2014. VTT Technology 162. 86 s. + liitt. 2 s.

Tiivistelmä

Käsillä oleva julkaisu on syntynyt osana "Low Carbon Finland 2050 platform" -hanketta. Hankkeessa luodaan vankkoja tiekarttoja vähähiiliselle ja kilpailukykyiselle yhteiskunnalle ja tarkastellaan vihreään teknologiaan liittyvän kasvun edellytyksiä. Hankkeen osapuolina toimivat VTT, Valtion taloudellinen tutkimuskeskus (VATT), Metsäntutkimuslaitos (Metla) ja Geologian tutkimuskeskus (GTK) koordinaation ollessa VTT:n vastuulla. Hanke kuuluu Tekesin Green Growth – Tie kestävään talouteen -ohjelmaan.

Hanke koostuu seuraavista osakokonaisuuksista

- arvioidaan strategisia luonnonvaroja ja niiden resursseja painottuen metsä- ja mineraalivaroihin
- tuotetaan skenaarioita vaihtoehtoisista kehityspoluista vähähiiliselle yhteiskunnalle vuoteen 2050 asti sekä
- kehitetään yhteistoimintamalli eli platform, joka voisi toimia interaktiivisena "vihreän talouden tulevaisuusfoorumina".

Painopiste tarkasteluissa on Suomen kehityksessä, mutta projektissa tuotetaan myös globaaleja skenaarioita. Käsillä oleva julkaisu toimii skenaarioiden taustamateriaalina keskittyen kriittisten metallien tarpeeseen vihreissä energiateknologioissa. Tarkasteltaviksi teknologioiksi on valittu seuraavat: aurinkosähkö, tuulivoima, hiilidioksidin talteenotto, ydinvoima, biopoltonesteeet, polttonennot, akut, elektrolyysi, vetyvarastot, sähköverkko (supergrid ja smart grid), sähköautot ja energiatehokas valaistus. Taustamateriaalia hyödynnetään globaaleissa tarkasteluissa, joissa arvioidaan kriittisten metallien kysyntää ja sen kehittymistä maailman markkinoilla, mikäli siirtymä vähähiiliseen yhteiskuntaan toteutuu. Kysyntää verrataan tiedossa oleviin geologisiin varantoihin. Skenaariotarkasteluiden tulokset esitellään toisaalla.

Avainsanat critical metals , reserves, resources, low carbon society, clean energy technology

Critical metals in clean energy technology

Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa. **Leena Grandell.**
Espoo 2014. VTT Technology 162. 86 p. + app. 2 p.

Abstract

This publication is a partial outcome of the "Low Carbon Finland 2050 -platform" project. The main objectives of the project are to generate road maps towards a low carbon and a competitive society and to evaluate the requirements for growth employing green technologies. The project is coordinated by VTT, with other participants from the Government Institute for Economic Research (VATT), Finnish Forest Research Institute (Metla), and Geological Survey of Finland (GTK). The project is a part of the Green Growth program funded by Tekes.

The project consists of the following tasks:

- Assessment of strategic resources with an emphasis on forest and mineral resources,
- Generating scenarios for alternative development paths to low carbon society until year 2050, and
- Development of a cooperative platform which could act as an interactive "green economy future forum".

The emphasis in the evaluations is in the development in Finland, but the project will also generate global scenarios. This report acts as supporting material concentrating on the need for critical metals in clean energy technologies. Following technologies have been selected for an evaluation: solar electricity, wind power, carbon capture and storage, nuclear power, biofuels, fuel cells, batteries, electrolysis, hydrogen storages, grids (supergrid and smart grid), electric cars, and energy efficient lighting. This supporting material will be employed in the global evaluations, assessing the demand for critical metals in the global markets, in case of a transition to a low carbon society. The demand for metals is compared to the known geological reserves. The results of the scenario evaluations will be presented separately.

Keywords critical metals , reserves, resources, low carbon society, clean energy technology

Alkusanat

Julkaisu liittyy osana hankkeeseen ”Low Carbon Finland 2050 -platform”. Hankkeessa luodaan vankkoja tiekarttoja vähähiiliselle ja kilpailukykyiselle yhteiskunnalle sekä tarkastellaan vihreään teknologiaan liittyvän kasvun edellytyksiä. Hankkeen osapuolina toimivat VTT, Valtion taloudellinen tutkimuskeskus (VATT), Metsätutkimuslaitos (Metla) ja Geologian tutkimuskeskus (GTK) koordinaation ollessa VTT:n vastuulla. Hanke kuuluu Tekesin Green Growth – Tie kestävään talouteen -ohjelmaan. Tutkimusta rahoittivat Tekesin lisäksi VTT, VATT, Metla ja GTK.

Hankkeen vastuullisena johtajana toimii tiimipäällikkö Tiina Koljonen (VTT) sekä projektipäällikkönä tutkija Lassi Similä (VTT). Muina osahankkeiden vastuullisina johtajina toimivat Juha Honkatukia (VATT), Maarit Kallio (Metla) sekä Laura Lauri (GTK). Projektin johtoryhmän puheenjohtajana toimi Pekka Tervo (TEM). Lisäksi johtoryhmään kuuluivat Magnus Cederlöf (YM), Outi Honkatukia (VM), Anne Vehviläinen (MMM), Saara Jääskeläinen (LVM) huhtikuusta 2013 alkaen, Raija Pikku-Pyhältö (Tekes) huhtikuuhun 2012 asti, sekä Christopher Palmberg (Tekes) ja Mikko Ylhäisi (Tekes) toukokuusta 2012 alkaen, Tuomo Suortti (Tekes) huhtikuuhun 2013 asti ja Kari Herlevi (Tekes) siitä alkaen, Riina Antikainen (Spinverse) marraskuuhun 2012 asti ja Kaisu Leppänen (Spinverse) siitä lähtien aina huhtikuuhun 2013 asti, Antti Asikainen (Metla), Maarit Kallio (Metla), Laura Lauri (GTK), Saku Vuori (GTK) kesäkuuhun 2012 saakka ja taas tammikuusta 2013 alkaen sekä Pekka Nurmi (GTK) ajalla 1.6.2012–31.12.2012, Tuomo Heikkilä (VATT), Juha Honkatukia (VATT), Satu Helynen (VTT), Tiina Koljonen (VTT), Kai Sipilä (VTT) ja Nina Wessberg (VTT). Johtoryhmän sihteerinä toimi Lassi Similä (VTT).

Hankkeen tutkijat haluavat kiittää johtoryhmää aktiivisesta osallistumisesta ja ohjauksesta.

Tammikuussa 2014

Tekijä

Sisällysluettelo

Abstract	4
Tiivistelmä	3
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	8
Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä.....	10
1. Johdanto	12
2. Kriittiset metallit.....	15
2.1 Kriittisyyden kriteerit.....	15
2.2 Selvityksiä.....	16
2.2.1 Suomen mineraalistrategia.....	16
2.2.2 Muita kansallisia mineraalistrategioita.....	17
2.2.3 Muita analyysejä.....	19
2.3 Mineraaliresurssien terminologiasta	21
3. Kriittisiä metalleja sisältäviä vähähiilisiä energiateknologioita.....	23
3.1 Energiaa tuottava sektori	23
3.1.1 Aurinkosähkö.....	23
3.1.2 Tuulivoima.....	26
3.1.3 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi.....	27
3.1.4 Ydinvoima	28
3.1.5 Biopolttonesteet.....	29
3.2 Polttokennot ja energiavarastot	30
3.2.1 Polttokennot sähkön ja lämmön tuotannossa	30
3.2.1.1 Kiinteäoksidipolttokenno	30
3.2.1.2 Fosforihappopolttokenno	31
3.2.1.3 Sulakarbonaattipolttokenno.....	32
3.2.2 Polttokennot ja vetyvarastot sähköautoissa.....	32
3.2.3 Elektrolyysi.....	32
3.2.3.1 Alkalielektrolyysi.....	32
3.2.3.2 Polymeerielektrolyysi.....	33
3.2.4 Vetyvarastot stationäärisissä ratkaisuissa.....	33

3.2.5	Muut energiavarastot	34
3.3	Sähköverkko	35
3.3.1	Super grid.....	35
3.3.2	Smart grid.....	35
3.4	Sähköä käyttävät teknologiat.....	36
3.4.1	Sähköautot.....	36
3.4.1.1	Moottori.....	36
3.4.1.2	Polttokenno ja vetyvarasto.....	37
3.4.1.3	Akusto	38
3.4.1.4	Tehoelektroniikka ja ohjausjärjestelmä	39
3.4.1.5	Auton ulkopuolinen latauspiste.....	39
3.4.2	Valaistus	40
4.	Kriittiset metallit.....	42
4.1	Telluuri.....	42
4.2	Indium.....	44
4.3	Gallium.....	46
4.4	Germanium	48
4.5	Hopea	49
4.6	Harvinaiset maametallit.....	51
4.7	Litium	55
4.8	Koboltti.....	57
4.9	Platinaryhmän metallit.....	59
4.10	Fluori F.....	63
4.11	Molybdeeni.....	64
4.12	Niobium ja tantaali	66
4.13	Vanadiini	67
4.14	Kooste kriittisten metallien varantotiedoista	69
5.	Johtopäätökset	71
	Kiitokset.....	74
	Lähdeluettelo.....	75
	Liite	

Lyhenneluettelo

AFC	alkaalipolttokenno (alkaline fuel cell)
a-Si	amorfinen pii
BGS	British Geological Survey
CCS	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (carbon capture and storage)
CFL	pienloistelamppu (compact fluorescent lamp)
CIGS	kupari-indium-gallium-selenidi
CIS	kupari-indium-selenidi
c-Si	kiteinen pii
CSP	keskittävä aurinkosähkö (concentrated solar power)
DESS	hajautetut energiavarastot (distributed energy storage systems)
DMFC	suora metanolipolttokenno (direct methanol fuel cell)
DOE	Department of Energy (U.S.)
DSM	kysyntäjousto (demand side management)
EDLC	superkondensaattori (electric double layer capacitor)
FACTS	Flexible AC Transmission Systems, joustavat AC-siirtojärjestelmät
FAME	rasvahapon metyyliesteri (fatty acid methyl ester), ensimmäisen sukupolven biodiesel
FT	Fischer-Tropsch-menetelmä synteettisen öljyn tuotantoon
GTK	Geologian tutkimuskeskus
HREE	painavat maametallit
HTS	korkean lämpötilan suprajohtava aine (high temperature superconductor)
HVAC	high voltage alternating current, korkeajännitteinen vaihtovirta
HVDC	high voltage direct current, korkeajännitteinen tasavirta

ICT	informaatio- ja kommunikaatioteknologia
ITO	indium-tinaoksidi
JORC	Joint Ore Reserves Committee
LED	valoa emittoiva diodi (light emitting diode)
LFL	kaksikantainen loistelamppu (linear fluorescent lamp)
LREE	keveät maametallit
MCFC	sulakarbonaattipolttokeho (molten carbonate fuel cell)
mc-Si	yksikiteinen pii
MOF	metal-organic framework, metallo-organiset yhdisteet
NdFeB	neodyymi-rauta-boori, kestopagneetti
NiMH	nikkelimetallihydridi-akku
OLED	orgaaninen LED
OPV	orgaaninen aurinkosähkö
PAFC	fosforihappopolttokeho (phosphoric acid fuel cell)
PEMFC	protonivaihtokalvopolttokeho (proton exchange membrane fuel cell)
pc-Si	monikiteinen pii
PGM	platinaryhmän metallit (platinum group metals)
PMU	osoitinmittauslaite (phasor measurement unit)
PV	aurinkosähkö (photovoltaics)
REE	harvinaiset maametallit (rare earth elements)
SCADA	valvomo-ohjelmisto (supervisory control and data acquisition)
SmCo	samarium-koboltti kestopagneetti
SOFC	kiinteäoksidipolttokeho (solid oxid fuel cell)
TCO	läpinäkyvä johtava materiaali (transparent conducting material)
USGS	United States Geological Survey
YBCO	yttrium-barium-kuparioksidi
YSZ	yttria-stabilised-zirkonia

Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä

Kuva 1 esittää alkuaineiden jaksollista järjestelmää. Julkaisun kattamat kriittisiksi luokitellut metallit on merkitty kuvan värillä. Kuvan alla on lista metalleista ja niiden kemiallisista lyhenteistä.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

platinaryhmän metallit
harvinaiset maametallit

Kuva 1. Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä. Vihreissä energiateknologioissa esiintyvät alkuaineet on merkitty kuvaan värillä. Punainen viittaa platinaryhmän metalleihin, sininen harvinaisiin maametalleihin.

Co	koboltti
Nb	niobium
W	voframi
Ta	tantaali

Te	telluuri
In	indium
Sn	tina
Hf	hafnium
Ag	hopea
Au	kulta
Dy	dysprosium
Ce	cerium
Tb	terbium
Eu	eurobium
Nd	neodyymi
La	lantaani
Ga	gallium
Cd	kadmium
Ni	nikkeli
Mo	molybdeeni
V	vanadiini
Cu	kupari
Se	seleeni
Pb	lyijy
Mn	mangaani
Cr	kromi
Y	yttrium
Zn	sinkki
Ti	titaani
Pt	platina
Pd	palladium
Ru	ruteeni

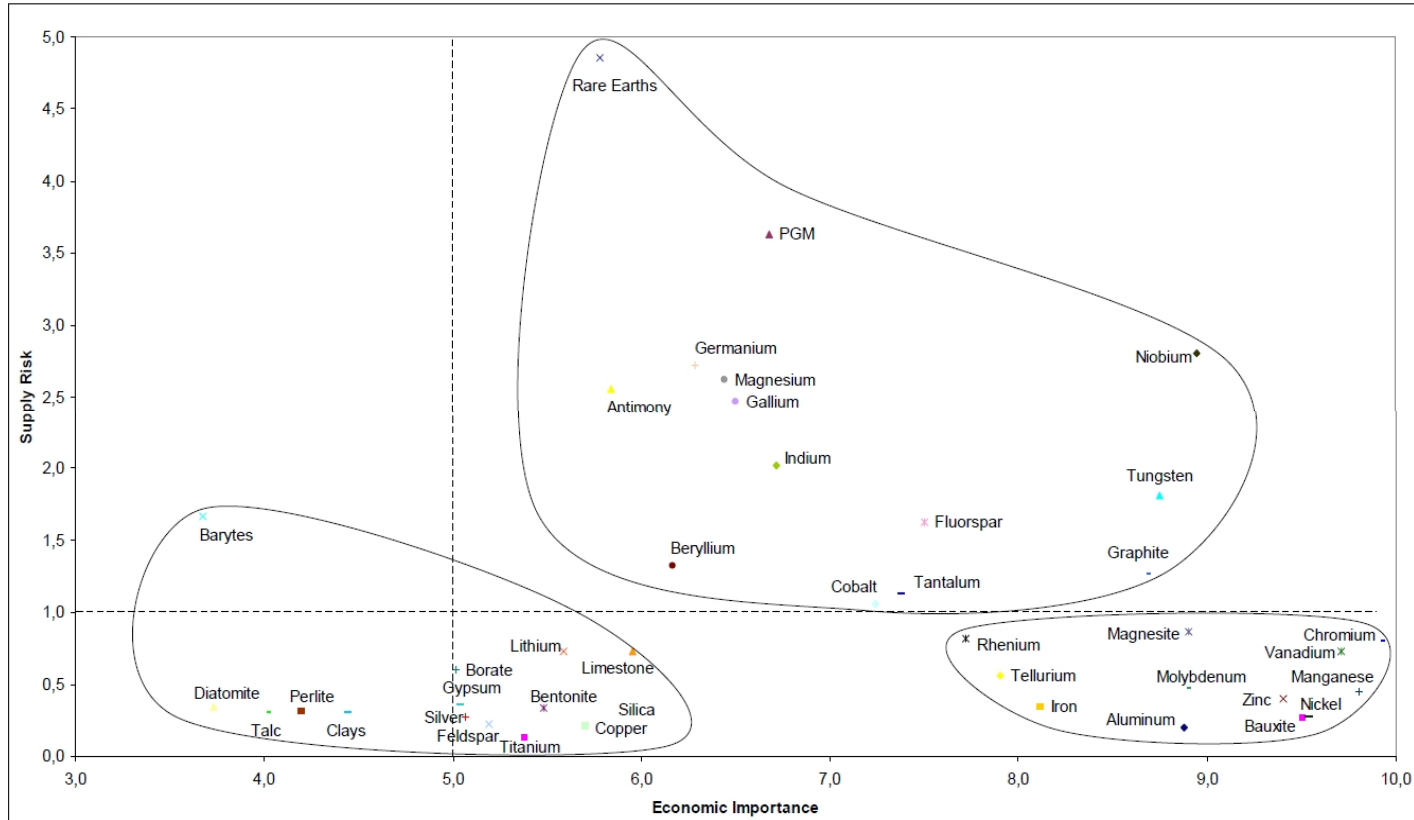
1. Johdanto

Viime vuosien aikana niin EU:ssa kuin muuallakin kehittyneissä ja kehittyvissä talouksissa on herätty huomaamaan yhteiskunnan riippuvuus ja haavoittuvuus tiettyjen erityismetallien osalta. Elektroniikkateollisuus sekä informaatio- ja kommunikaatioteknologia ovat riippuvaisia monista puolijohdemetalleista, kuten indiumista, germaniumista tai galliumista. Monissa lääketieteen sovellutuksissa käytetään jalometalleja kuten kultaa, hopeaa ja platinaa. Kemianteollisuudesta esimerkkinä voisivat olla katalyytit, jotka usein kuuluvat platinaryhmän metalleihin tai harvinaisiin maametalleihin.

Muutokset energiasektorilla tulevat jatkossa korostamaan mineraalisten raaka-aineiden merkitystä. Toisaalta ilmastonmuutoksen luoma tarve kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseen kuin myöskin tarve kasvattaa energiaomavaraisuutta, ovat nostaneet nk. vihreät energiateknologiat muutoksen keskiöön. Vihreisiin energiateknologioihin on tässä raportissa laskettu kuuluvaksi hiilivapaat energiantuotantomuodot, kuten aurinko- ja tuulivoima, vesivoima, biomassa ja ydinvoima sekä hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Aurinkosähköteknologiat nojaavat puolijohdemateriaalien ohella myös hopeaan ja ruteniumiin teknologiasta riippuen. Tuulivoiman kohdalla esiintyvät kestopagneettien sisältämät harvinaiset maametallit ja biopolttoaineiden valmistuksessa Fischer-Tropsch-menetelmällä tarvitaan kobolttia ja ruteniumia katalyyttinä. Ydinvoimaloissa ja CCS-teknologiassa tarvitaan erilaisia metalliyhdisteitä, joissa esiintyy mm. molybdeeniä, vanadiinia, hafniumia, niobiumia, tantaalia, reenumia ja yttriumia. Energian tuotannon ohella myös tietyt energian käyttöpuolen teknologiat voidaan mieltää vihreiksi energiateknologioiksi. Tällaisia ovat esimerkiksi energiaa säästävät valaisimet, joiden loisteaineissa tarvitaan harvinaisia maametalleja, sähköautot, joiden moottoritekniikka perustuu kestopagneetteihin tai erilaiset sähkön varastointiin liittyvät teknologiat, kuten akkuteknologiat (litium, harvinaiset maametallit, koboltti, vanadiini) tai elektrolyysi ja polttokennot (koboltti, platina sekä harvinaiset maametallit). Jatkossa onkin odotettavissa, että energiasektorilla sähkön merkitys tulee korostumaan entisestään polttoaineisiin nähden energijärjestelmän sähköistyessä. Tämä osaltaan asettaa vaatimuksia sähköverkon laajentamiselle ja kehittämiselle smart gridin ja super gridin suuntaan. Nimitys smart grid viittaa älykkääseen sähköverkkoon ja super grid Euroopan laajuiseen verkkoon, joka mahdollistaa sähkön siirron pitkienkin etäisyyksien päähän. Kaapelointi perustuu ennen kaikkea kupariin ja alumiiniin,

mutta verkon älykkyyden lisääminen tulee korostamaan elektroniikan ja siihen liittyvien erityismetallien tarvetta.

Euroopan komission asettama työryhmä selvitti EU:n talouden kannalta kriittisiksi luokiteltavia materiaaleja ja työn pohjalta julkaistiin vuonna 2010 raportti, joka on sittemmin toiminut pohjana jatkotyöskentelyille [European Commission, 2010]. Raportti käy läpi yhteensä 41 eri mineraalia tai metallia ja analysoi niiden kriittisyyttä kymmenen vuoden aikaperspektiivillä. Kriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin merkitys taloudelle, geologiset resurssit sekä niiden konsentroituminen joillekin maille, taloudellinen vakaus tuottajamaissa, korvattavuus ja kierrätettävyyss sekä ympäristöriski. Ympäristöriskillä tarkoitetaan tässä yhteydessä ympäristölainsäädännön asettamia mahdollisia esteitä mineraalin louhinnalle. Raportissa päädytään luokittelemaan yhteensä 14 materiaalia EU:n talouden kannalta kriittisiksi. Edellytyksenä tähän ryhmään kuulumiselle on, että metalli tai mineraali on samanaikaisesti sekä talouden kannalta merkittävä ja lisäksi sen saatavuuteen liittyy riski. Tähän ryhmään kuuluvat harvinaiset maametallit, platinaryhmän metallit, germanium, magnesium, gallium, antimoni, indium, beryllium, koboltti, tantalum, fluoriitti, grafiitti, niobium sekä volframi. Kriittisten materiaalien ohella raportissa käytetään vielä jaottelua "taloudellisesti erittäin merkittävät" sekä "taloudellisesti merkittävät" materiaalit, joihin ei kuitenkaan katsota liittyvän saatavuusongelmia. Kuva 2 havainnollistaa raportin käyttämää jaottelua sekä materiaalien jakautumista ryhmiin. X-akseli kuvaa materiaalin merkitystä taloudelle ja y-akseli saatavuusriskiä. Kriittiset materiaalit näkyvät kuvassa oikeassa yläkulmassa.



Kuva 2. EU:n analyysin mukainen mineraalien kriittisyysluokitus [European Commission, 2010].

2. Kriittiset metallit

Viime vuosina on julkaistu lukuisia kriittisiä metalleja ja mineraaleja koskevia selvityksiä. Analyysit ovat joko sektorikohtaisia tai ne saattavat olla maakohtaisia, jolloin painopisteeksi valikoituu kokonaisen kansantalouden riippuvuus tietyistä metalleista. Selvityksissä on kehitetty erilaisia arviointimenetelmiä metallin kriittisyyden tunnistamiseksi. Menetelmissä on havaittavissa eroja, kuitenkin siten, että samat keskeiset periaatteet toistuvat. Luvussa 2.1. tuodaan esiin näitä keskeisiä kriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä. Luku 2.2 koostaa yhteen tähän mennessä aiheen tiimoilta julkaistuja raportteja.

2.1 Kriittisyyden kriteerit

Keskeinen tekijä arvioitaessa metallin kriittisyyttä on sen merkitys taloudelle tai jollekin talouden osasektorille. Mikäli mielenkiinto kohdistuu yhteen talouden sektoriin, kuten meidän tapauksessamme vihreään energiateknologiaan, keskeiseksi nousee kysymys metallin kilpailevista muista käyttökohteista. Esimerkiksi aurinkopaneelin puolijohdemateriaaleilla on kilpailevia käyttökohteita elektroniikkateollisuudessa. Toinen keskeinen kysymys liittyy substituutioon. Helpotusta tilanteeseen voi tuoda mahdollisuus korvata kriittiseksi luokiteltu metalli jollain toisella aineella. Myös metallin kierrätettävyys on yksi osatekijä.

Metallin merkityksen arvioimisen lisäksi keskeistä on saatavuusriskin arvioiminen. Mineraalivara- ja varantoarvioissa huomioidaan tunnetut geologiset esiintymät. Esiintymien suhteuttaminen vuotuisen kulutukseen antaa ensimmäisen arvion metallin kriittisyydestä. Yhteistuotanto muiden mineraalien kanssa tai vaihtoehtoisesti sivutuote jonkin toisen mineraalin louhinnan yhteydessä nostavat saatavuusriskiä. Tällöin metallin tuotantoon vaikuttavat ensisijaisesti kaivoksen pääasiallisen metallin markkinanäkymät, eikä tuotantoa kasvateta, vaikka sivutuotteelle olisikin kasvavaa kysyntää. Esimerkiksi merkittävä osa galliumista tuotetaan bauksiitin yhteydessä, jolloin galliumin tuotannon vaihtelut määräytyvät alumiinin markkinatilanteen mukaan. Geologisen saatavuuden lisäksi poliittisella ja taloudellisella vakaudella mineraalia tuottavissa maissa on suuri merkitys. Saatavuusriski kasvaa, mikäli mineraalin varannot ovat konsentroituneet maailmanlaajuisesti vain muutamiin maihin. Ympäristöriskiksi ymmärretään tuottajamaissa mahdollinen kiristynvä ympäristölainsäädäntö, joka saattaa vaikeuttaa tai mahdollisesti estää kaivostoiminnan.

2. Kriittiset metallit

Kierrätyksellä voidaan helpottaa riippuvuutta neitseellisestä raaka-aineesta. Metallin kierrätyksellä on kuitenkin useita rajoittavia tekijöitä. Joissakin käyttökohteissa metallin hävikki on korkea. Esimerkiksi useissa lääketieteeseen tai hygieniaan liittyvissä sovelluksissa hopea päätyy jätevesien tai jätteiden mukana ympäristöön eikä ole kierrätettävissä. Metallin hinta ei aina luo tarvittavaa insentiiviä kierrätykselle ja joissakin tapauksissa esteenä saattavat olla puutteellinen kierrätysinfrastruktuurit tai -teknologia. Samoin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet saattavat tehdä joidenkin metallien kierrätyksestä hyvin vaikeaa ja kallista. Litium on jaksollisen järjestelmän kevyin metalli, ja sillä on alhainen kiehumispiste, mikä tekee litiumin talteenotosta kierrätysprosessissa hyvin haasteellisen.

Yksi metallien kriittisyyteen vaikuttava tekijä on aikaperspektiivi, jolla kysymystä lähestymme. Metallin luokittelu kriittisyysasteikolla vaihtelee riippuen siitä, tarkastelemmeko tilannetta lyhyellä (0–5 vuotta), keskipitkällä (5–10 vuotta) vaiko pitkällä (yli 10 vuotta) aikavälillä. Kaivosteollisuudessa investoinnit ovat tyypillisesti aikaa vieviä, uuden kaivoksen käyntiin saattaminen vie vähimmillään vuosikymmenen [Kauppila et al., 2011] ja siten lyhyen aikavälin saatavuusongelmat saattavat helpottaa, kun uusia kaivoksia tulee tuotantoon.

Alla oleva Taulukko 1 kokoaa yhteen metallin kriittisyyden arvioinnissa käytetyt kriteereitä.

Taulukko 1. Metallin kriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä.

Metallin merkitys	Saatavuusriski
merkitys taloudelle	geologisen varat, varannot
merkitys vihreälle teknologialle	sivutuote / päätuote
markkinatilanne: kilpailevat sovelluskohteet	varantojen keskittyneisyys
substituution mahdollisuus	poliittinen ja taloudellinen riski tuottajamaissa
	ympäristöriski
	kierrätettävyys

2.2 Selvityksiä

2.2.1 Suomen mineraalistrategia

Suomen mineraalistrategia on laadittu ilmasto- ja energiapoliittisen työryhmän toimeksiannosta [Suomen mineraalistrategia, 2010]. Strategia toteaa mineraalien merkittävän roolin nykyisessä yhteiskunta- ja talousjärjestelmässä ja näkee mineraalialan kansainväliset haasteet Suomelle suurina mahdollisuuksina. EU:n listattujen kriittisten metallien osalta Suomessa on jo tällä hetkellä kriittisten metallien kaivostoimintaa (Nb, PGM, Co) sekä tunnettuja esiintymiä (W, Ta, REE, grafiitti,

antimoni). Myös muiden kriittisten metallien osalta on oletettavissa löytymispotentiaalia. Varsinaisen kaivos- ja kaivannaisteollisuuden lisäksi mineraaliala käsittää myös yritykset, jotka tuottavat sekä koneita että alan palveluja sekä yliopistot ja muut tutkimuslaitokset. Strategian mukaan 70–90 % maanalaisten kaivosten vaatimasta teknologiasta maailmanlaajuisesti on peräisin Suomesta tai Ruotsista. Siten mineraalialassa ja sen tulevissa haasteissa nähdäänkin Suomelle merkittävä taloudellinen ja työllistävä potentiaali, joka kaivostoiminnan osalta keskittyy erityisesti Itä- ja Pohjois-Suomeen. Myös mineraaleja jalostavan teollisuuden osalta nähdään jatkossa kasvupotentiaalia.

Mineraalistrategian pitkän aikavälin tavoitteena nähdään elinvoimainen mineraaliala, joka on kilpailukykyinen, turvaa Suomen raaka-ainehuoltoa, tukee alueellista kehitystä sekä edistää luonnonvarojen vastuullista hyödyntämistä. Alalla on merkittävä vaikutus Suomen kansantalouteen, työllisyyteen ja yhteiskuntaan, ja sen varaan on mahdollista luoda jatkojalostusta, osaamista ja vientiä. Siten mineraaliala nähdäänkin strategiassa potentiaalisena tulevana tukijalkana Suomen kansantaloudelle [Suomen mineraalistrategia, 2010].

2.2.2 Muita kansallisia mineraalistrategioita

Kansalliset mineraalistrategiat heijastavat kunkin maan omaa elinkeinoelämän rakennetta, sen raaka-aineiden tarvetta sekä mahdollisuutta omaan mineraalituotantoon. Mineraaleiltaan rikkaissa maissa strategia keskittyy oman kaivostoiminnan elvyttämiseen vastaamaan kysynnän tarpeita. Kiristyvää tilanne mineraalien tuotannossa maailmanmarkkinoilla nähdään erityisesti mahdollisuutena luoda vaurautta ja vakautta omaan talouteen. Strategiat keskittyvätkin lähinnä kaivostoiminnan edellytysten parantamiseen. Toisaalta raaka-ainetuonnista riippuvissa maissa korostuvat keinot luotettavien raaka-ainevirtojen ylläpitämiseksi. Seuraavaksi käydään läpi muutamien muiden maiden vastaavia mineraalistrategioita kuin edellä esitettiin Suomen osalta.

RUOTSI

Ruotsin vuonna 2013 julkaisema mineraalistrategia näkee Suomen strategian tavoin mineraalien kysynnän kasvun mahdollisuutena. Strategia keskittyy kaivostoiminnan kehittämiseen kestäväen kehityksen periaatteiden mukaisesti, riittävän infrastruktuurin kehittämiseen, lupakäytäntöjen selkiinnyttämiseen sekä pyrkii luomaan edellytyksiä investointien vauhdittamiselle. Lisäksi kaivosyhtiöiden ja tutkimuslaitosten välistä yhteistyötä pyritään lisäämään [Näringsdepartementet, 2013].

NORJA

Norjan hallituksen vuonna 2013 julkaisema mineraalistrategia asettaa tavoitteeksi Norjan mineraalivarojen mahdollistaman talouden kasvupotentiaalin sekä sen tuoman hyvinvoinnin lisäämisen. Hallitus näkee tehtäväkseen huolehtia vakaasta

2. Kriittiset metallit

ja ennustettavasta toimintaympäristöstä ja siten edistää tarvittavia investointeja. Toimenpiteet koskevat taloudellista toimintaympäristöä, ympäristölainsäädäntöä sekä panostuksia koulutukseen ja tutkimukseen [Nærings- og handelsdepartementet, 2013].

RANSKA

Vuonna 2010 Ranska valmisteli kriittisten metallien käyttöön kohdistuvan ohjelman ”Strategic Metals Plan”. Se käy läpi Ranskan elinkeinoelämälle tärkeiden teknologioiden metallitarpeita keskittyen erityisesti vihreässä energiateknologiassa käytettäviin materiaaleihin. Ohjelma identifioi keskeiset kriittiset metallit sekä kuvaa strategioita raaka-aineiden riittävyyden varmistamiseksi liittyen materiaalihokkuuteen, kierrätykseen ja kaivostoimintaan. Ohjelman tueksi perustettiin vuonna 2011 työryhmä ”Comittee for Strategic Metals COMES” [EEA, 2011].

SAKSA

Saksan hallitus linjasi raaka-ainestrategiaansa vuonna 2010 ilmestyneessä raportissa ”Rohstoffstrategie der Bundesregierung”. Hallitus tukee raaka-aineista riippuvaa teollisuutta useilla keinoilla: tutkimus- ja kehitystyötä ohjataan resurssien tehokkaampaan käyttöön ja kierrätykseen, ulkomaisten investointien saamista Saksan kaivostoimintaan edesautetaan, tuetaan kansallisen kaivostoiminnan kehittämistä ja siten edesautetaan omavaraisuutta kriittisten metallien osalta. Sen sijaan metallien varastojen ylläpitäminen kuuluu hallituksen mukaan yksityisen sektorin vastuualueeseen [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2010].

ALANKOMAAT

Alankomaat on julkaissut oman mineraalistrategiansa, joka tosin jää hyvin yleiselle tasolle koostuen lähinnä politiikan ohjauskeinoista [Dutch Ministry of Foreign Affairs]. Sitä täydentää Statistics Netherlandsin julkaisema selvitys, joka pohjaa EU:n kriittisten mineraalien selvitykseen ja käy läpi kyseisten 41 mineraalin merkityksen Alankomaiden elinkeinoelämälle [Statistics Netherlands, 2010]. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency on julkaissut vuonna 2011 selvityksen, joka käsittelee resurssien saatavuusongelmaa Alankomaiden ja EU:n näkökulmasta [PBL, 2011].

JAPANI

Japanin elinkeinoelämä on pitkälti riippuvainen tuontiraaka-aineista. Siksi Japanin teollisuudesta ja taloudesta vastaava ministeriö on julkaissut vuonna 2009 strategian nimeltä ” Strategy for Ensuring Stable Supplies of Rare Metals” [METI, 2009]. Strategia nojaa neljään pilariin. Ensimmäinen käsittää Japanin ulkomailta tulevien raaka-ainevirtojen varmistamisen lähinnä japanilaisin investoinnein, toinen keskittyy kierrätyksen ja uudelleenikäytön tehostamiseen. Kolmas tukipilari käsittää

kriittisten metallien substituutiomahdollisuuksia tuotekehityksen kautta. Neljäs elementti strategiassa koskettaa sekä julkisen että yksityisten tahojen kriittisten metallien varastojen kehittämistarvetta. Nykyisellään Japani ylläpitää seitsemän metallin osalta 42 päivän varastoja, jonka päälle tulevat teollisuuden omat varastot.

ETELÄ-KOREA

Korean tilanne muistuttaa Japania sikäli, että maalla ei itsellä ole merkittäviä raaka-ainevarantoja. Korean ohjelma nojaa niin ikään neljään peruspilariin, jotka pitkälti noudattavat japanilaista ohjelmaa (ulkomaisten raaka-ainevirtojen varmistaminen, varastointi, substituutio sekä kierrätys). [MIT, 2010.]

TAIWAN

Taiwan pyrkii reagoimaan resurssiongelmiin kehittämällä kierrätystä kohti suljettua kiertoa. Taiwanin ympäristöviranomainen Environment Protection Administration EPA käynnisti vuonna 2002 kierrätyksen kehittämiseen tähtäävän ohjelman nimeltä Zero Waste Programme [Environmental Protection Administration, 2010].

2.2.3 Muita analyysejä

Kansallisten mineraalistrategioiden ohella on julkaistu myös lukuisia muita aihepiiriin liittyviä raportteja sekä tieteellisiä artikkeleita. Tässä keskitytään erityisesti energiasektoria käsitteleviin analyyseihin, joskin yleisempiäkin tutkimuksia tuodaan esiin.

EU-TUTKIMUS

Edellisessä kappaleessa mainittu EU:n koko talouden kattava analyysi tarkentui energiasektorin osalta JRC:n selvityksen myötä [Moss et al., 2011]. Raportti keskittyy ydinvoimaan, aurinko- ja tuulisähköön, bioenergiaan, hiilidioksidin talteenottoon ja sähköverkon laajentamiseen. Lähtökohdaksi on valittu Euroopan tavoitteet kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi sekä tästä nouseva tarve lisätä vähähiillisiä teknologioita. Raportissa arvioidaan metallin tarve yhteensä 60 alkuaineen osalta perustuen vähähiillisten teknologioiden lisäämistarpeeseen. Aikaperspektiiviksi on valittu vuosi 2030. Ne metallit, joiden kohdalla tarve on yli 1 % nykyisestä vuosituotannosta, määritellään kriittisiksi.

CRM Innonet -projekti on EU-rahoitteinen tutkimusprojekti, joka keskittyy kriittisten metallien substituution kehittämiseen. Projektissa huomioidaan energiasektorin ohella myös muita talouden osa-alueita. Lähestymistapa on toisaalta sektorikohtainen, toisaalta metallikohtainen. Projektissa kerätään tietokanta jäsenmaissa käynnissä olevista substituutioon tähtäävistä hankkeista sekä luodaan tietokanta, joka hahmottaa EU:n talouden mahdollisuuksia substituution kautta lieventää riippuvuutta kriittisistä metalleista. Projektilla on omat internetsivut [CRM Innonet].

2. Kriittiset metallit

Polinares on toinen EU-rahoitteinen projekti, joka mineraaliresurssien ohella tarkastelee myös kaasu- ja öljyvaroja. Eurooppalaisen perspektiivin sijaan se on ottanut globaalin näkökulman tarkoituksenaan identifioida resurssien niukkuudesta johtuvia jännitteitä ja kilpailua resurssien markkinoilla. Projekti pyrkii etsimään uusia yhteistyöhön tähtäviä ratkaisuja eri markkinaosapuolten kesellä, joista EU on yksi. Projektilla on oma internetsivu [Polinares].

AMERIKKALAINEN TUTKIMUS

Yhden keskeisimmistä analyyseistä energiasektorin osalta on julkaissut DOE. Raportti analysoi kriittisiä metalleja tuuli- ja aurinkosähkön tuotannossa ja myös sitä, mitä metalleja tarvitaan sähköautoissa ja valaistuksessa. [DOE, 2011.] Toinen energiasektoriin keskittyvä selvitys on MIT:n energiainitiatiivin (MITEI) yhdessä American Physical Society'n kanssa julkaisema raportti "Energy Critical Elements", jossa käydään läpi kriittisyyden määrittäviä tekijöitä. Raportti toteaa, että USA on on 90 prosenttisesti riippuvainen tuontimineraaleista energiateknologioiden osalta. [APS/MRS, 2011].

Resnick instituutin raportti täydentää kahta aikaisempaa tutkimusta ja lisää energiasektorin kriittisiin metalleihin mukaan hopean [Resnick, 2011].

BRITTLÄINEN TUTKIMUS

British Geological Survey kokoaa, ylläpitää ja päivittää listaa kriittisistä mineraaleista [BGS, 2012]. Kriittisyys määräytyy yksinomaan mineraalien saatavuuden perusteella, se ei ota kantaa teknisten sovellusten merkittävyyteen sen enempää kuin korvaavuuskysymyksiinkään.

Resource Efficiency Knowledge Transfer Network julkaisi yhden varhaisimmista analyyseistä kriittisistä materiaaleista. Analyysissä käydään läpi 69 elementtiä ja päädytään yhteensä kahdeksan kriittisen elementin listaan [Morley & Etherley, 2008].

Defran raportti puolestaan keskittyy materiaaleihin liittyviin riskeihin yritysten näkökulmasta. [Defra, 2010].

Department for Transport (DfT) sekä Business, Innovation and Skills (BIS) keskittyy erityisesti kestoplaneetteihin sekä akkuteknologiaan niin sähköautoissa kuin tuulivoimassakin [Oakdene Hollins, 2010].

Simmonsin raportti "Materials critical to the energy industry. An introduction" luo historiallisen katsauksen esiteolliselta ajalta nykypäiviin saakka energiateknologian materiaalinäkökulmasta käsin. Raportissa tarkastellaan tarkemmin 19 metallia, jotka ovat merkittäviä seuraavassa energiasektorin murroksessa, jossa sähkön ja uusiutuvien energialähteiden merkitys energiasektorilla kasvaa [Simmons et al., 2011].

SAKSALAINEN TUTKIMUS

Fraunhofer ISI ja Fraunhofer IZT toimesta on tehty katsaus, joka selvittää 32 uutta teknologiaa kriittisten metallien näkökulmasta. Selvitys kattaa paitsi energiateknologian myös muita talouselämän sektoreita. Kriittisiksi materiaaleiksi selvitys listaa yhteensä 22 mineraalia [Angerer et al., 2009].

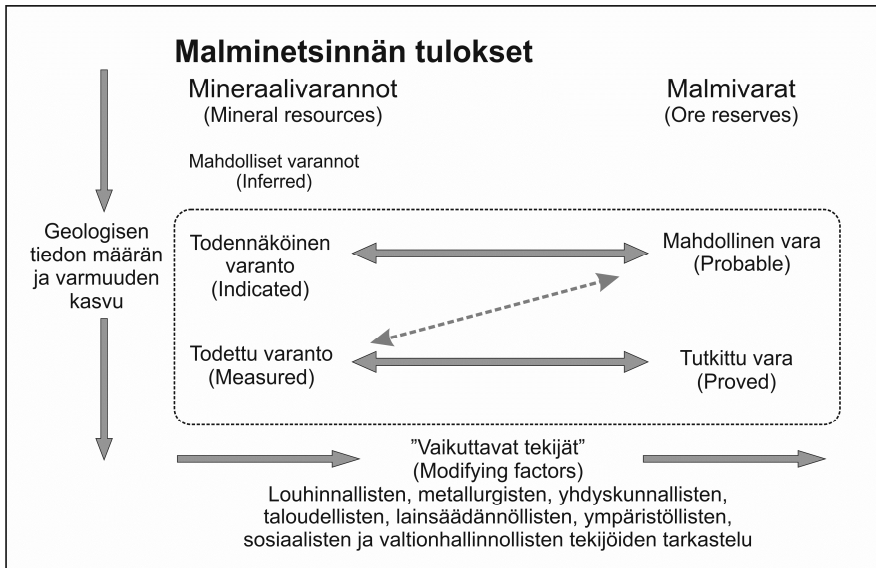
Öko-insituutin raportti käy läpi 11 kriittistä metallia ja selvittää niiden merkityksen aurinkosähkön, akkuteknologian, katalyyttien ja sähkölaitteiden osalta. Lisäksi raportti käsittelee erityisesti mineraalien kierrätysmahdollisuuksia [Buchert et al., 2009]. Toinen Öko-Insituutin raportti keskittyy harvinaisiin maametalleihin sekä niiden kierrätyspotentiaaliin. Analyysissä tarkastellaan lähemmin kestopagneetteja sekä harvinaisten maametallien käyttöä valaistusteknologiassa ja katalyytteinä [Schüler et al., 2011].

2.3 Mineraaliresurssien terminologiasta

Mineraalien esiintymät jaetaan mineraalivarantoihin ja malmivaroihin. Malmivarat käsittävät sen osan varannosta, joka on nykyisessä teknisessä, lainsäädännöllisessä, yhteiskunnallisessa ja sosiaalisessa ympäristössä taloudellisesti hyödynnettävissä. Tiedot malmivaroista päivittyvät jatkuvasti toisaalta kaivosteknisen kehityksen, metallien maailmanmarkkinahintojen sekä lainsäädännöllisten ja sosiaalisten muutosten myötä. Varat jaetaan mahdollisiin ja tutkittuihin, riippuen malmivaraa koskevan geologisen tiedon varmuudesta ja luotettavuudesta. Kuva 3 havainnollistaa jaottelua.

Mineraalivaranto on laajempi käsite, joka pitää sisällään kaikki sellaiset mineraaliesiintymät, jotka geologisten ominaisuuksiensa puolesta voisivat joskus tulla kaivostoiminnan piiriin. Keskeiset kysymykset liittyvät mineraalin konsentraatioon, esiintymän laatuun, paksuuteen ja syvyyteen. Varanto sisältää siis malmivarojen lisäksi myös sellaisia esiintymiä, jotka nykyisessä teknistaloudellisessa tilanteessa eivät ole hyödynnettävissä. Varannot jaetaan mahdollisiin, todennäköisiin ja todennettuihin esiintymää koskevan tiedon luotettavuuden mukaan.

Sivutuote on mineraali, jota louhitaan jonkin toisen mineraalin yhteydessä, tällöin on taloudellisesti mahdollista hyödyntää myös alhaisempien mineraalipitoisuuksien esiintymiä. Tyypillisiä esimerkkejä sivutuotteina louhittavista metalleista ovat germanium, gallium, telluuri ja indium. Myös hopean tuotannosta noin kaksi kolmasosaa on kulta-, kupari- tai lyijy- ja sinkkikaivosten sivutuotantoa.



Muokattu: JORC 2012

Kuva 3. Mineraaliresurssien luokittelu JORC standardin mukaisesti [JORC, 2012]. Kuva Susanna Kihlman, GTK.

Tässä julkaisussa esiintyvät mineraalien varantotiedot ovat peräisin USGS:n tietokannoista. USGS:n ilmoittama arvio malmivaralle (eng. reserve) pitää sisällään mahdollisen ja tutkitun malmivaran. Vastaavasti USGS:n julkaisemat arviot varannoista (eng. reserve base) käsittävät malmivarojen lisäksi todennäköiset ja todetut varannot [Kihlman, 2013].

3. Kriittisiä metalleja sisältäviä vähähiilisiä energiateknologioita

Siirtymä kohti vähähiilistä yhteiskuntaa edellyttää teknologisia muutoksia sekä energian tuotannon että energian siirron ja kulutuksen osalta. Pienemmät yksiköt ja energian tuotannon rakenteen hajauttaminen edellyttävät muutoksia sähköverkkoon. Samoin uusiutuvien energialähteiden kausittainen luonne asettaa vaatimuksia energian varastoinnille. Liikenteen osalta siirtyminen polttomoottoreista kohti sähköautoja kasvattaa edelleen sähkön osuutta energiasektorin rakenteessa.

Valitettavasti monet vähähiilisistä tekniikoista sisältävät yhtä tai useampia kriittisiä metalleja. Seuraavaksi luodaan läpileikkaus energian tuotannosta varastoinnin ja siirron kautta energiaa kuluttaviin teknologioihin. Teknologiat on valittu siten, että ne edustavat vähähiilistä taloutta. Siten niiden osalta on odotettavissa merkittävää kasvua, kun maailmanlaajuiset pyrkimykset kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi tulevat kasvattamaan kyseisten tekniikoiden kysyntää. Täten mm. siirtymävaiheessa tärkeä polttomoottoreiden katalyysitekniikka jää pois tarkastelusta, vaikka siinä esiintyykin kriittiseksi luokiteltua platinaa.

3.1 Energiaa tuottava sektori

3.1.1 Aurinkosähkö

KITEISEEN PIIHIN PERUSTUVAT TEKNOLOGIAT

Aurinkosähköpaneelija, jotka perustuvat kiteiseen piihin (c-Si, chrystalline silicon) kutsutaan ensimmäisen sukupolven paneeleiksi. Kiteisellä piillä on edelleen hallitseva 80 %:n markkina-asema aurinkopaneelimarkkinoilla [EPIA, 2011]. Valmistustavan mukaan paneelit ovat jaoteltavissa kolmeen ryhmään: yksikiteinen pii (mc-Si), polykiteinen pii (pc-Si) sekä nauhapii (ribbon/sheet c-Si). Paneelien hyötysuhteet vaihtelevat välillä 14–22 % teknologiasta riippuen. Pii (Si) on yksi maankuoren yleisimmistä alkuaineista, eikä puolijohdemateriaalissa esiinny muitakaan kriittisiksi luokiteltavissa olevia metalleja. Kennot yhdistetään toisiinsa sähköisillä kontakteilla. Kontaktin materiaalina käytetään metalliseosta, jonka tärkein komponentti on

hopea sen erittäin korkean sähkönjohtavuuden takia. Metallin korkean sähkönjohtavuuden ansiosta pystytään varauksen keräävien hopealankojen pinta-ala pitämään pienenä ja siten siitä aiheutuvat varjostukset paneelille jäävät pieniksi. Hopean hinta tulee kuitenkin aiheuttamaan rajoitteita paneelien valmistukselle. Tästä syystä teollisuudessa on kehitteillä erilaisia teknologisia ratkaisuja hopeariippuvuuden vähentämiseksi. Ns. ”metal wrap through” -menetelmä, joka on jo kaupallisessa tuotannossa, vähentää hopean kulutusta 30 % verrattuna perinteiseen paneelin hopeointiin [Savin, 2013]. Lisäksi kehitteillä on menetelmä, jossa hopea korvataan suurelta osin kuparilla. Kuparin ongelma on sen voimakas hapettuminen, minkä vuoksi kuparilangat tulee päällystää jollain toisella metallilla, esimerkiksi hopealla. Samoin kupari reagoi piin kanssa, siten kuparin ja puolijohdemateriaalin väliin tarvitaan kerros nikkeliä, titaania, wolframia tai kromia [Savin, 2013]. Paneelien valmistajien näkemyksen mukaan nykyinen hopean tarve (noin 8 g/m^2) tulee pienemään kymmenekseen vuoteen 2020 mennessä [ITRPV, 2013].

OHUTKALVOPANEELIT

Toisen sukupolven paneelit, ohutkalvopaneelit, tarjoavat merkittäviä etuja kiteiseen pihin perustuvaan teknologiaan nähden. Puolijohdemateriaalia levitetään joko yksi tai useampi kerros substraatin (esim. lasi, muovi) päälle. Johtuen absorboivan kerroksen ohuudesta (nanometrien tai mikrometrien luokassa) materiaalin tarve ei ole suuri.

CdTe-paneelin valmistuskustannukset ovat alhaiset ja siten sitä pidetään lupaavimpana ohutkalvoteknologiana. Hyötysuhde on verraten korkea, noin 10–11% [EPIA, 2011]. Telluuri luokitellaan kriittiseksi mineraaliksi, sen tarpeen arvioidaan olevan $6,5 \text{ g/m}^2$ [Andersson, 2000].

CIS tai CIGS (kupari-indium-selenidi tai kupari-indium-gallium-selenidi) antaa korkeimman hyötysuhteen, laboratorio-oloissa 20 % ja kaupallisissa tuotteissa 7–12 % [EPIA, 2011]. Indium ja gallium luokitellaan kriittisiksi mineraaleiksi. Niiden tarpeeksi on arvioitu $2,9 \text{ g/m}^2$ (In) ja $0,53 \text{ g/m}^2$ (Ga) [Andersson, 2000].

Amorfisen piin (a-Si) ohutkalvokennoilla on verraten alhainen hyötysuhde, 4–8 %. Kenno kärsii degradaatiosta¹, jonka seurauksena sen hyötysuhde heikkenee auringonvalon vaikutuksesta. Degradoitumista voidaan lieventää kerrostamalla kenno kahteen tai useampaan fotoaktiiviseen kerrokseen (a-Si/ $\mu\text{c-Si}$). Mikrokiteinen kerros tuo kennolle stabiiliutta ja nostaa kennon hyötysuhdetta noin 7–9 prosenttiin [EPIA, 2011]. Myös tandemrakenteen, jossa amorfista piitä on täydennetty germaniumilla (aSi:Ge), nostaa paneelin hyötysuhdetta. Paneelin etupinnalla varauksen kerääminen tapahtuu ITO-kerroksen avulla (indium-tin-oxide). ITO-kerroksen paksuus on tyypillisesti 60 nm [Angerer et al., 2009]. Tästä voidaan laskemalla

¹ Valon ansiosta amorfisen piin rakenne kärsii, mikä lisää elektroniukkoparien rekombinoitumista ja siten heikentää kennon hyötysuhdetta. Lämmöllä on päinvastainen rakennetta korjaava vaikutus. Ilmiöstä käytetään myös nimitystä Stabler-Wronski-efekti.

johtaa indiumin tarpeeksi noin $0,4 \text{ g/m}^2$. Takapinnalla sähköisen kontaktin luomisessa voidaan hyödyntää alumiinia tai hopeaa [Angerer et al., 2009].

KOLMANNEN SUKUPOLVEN AURINKOPANEELIT

Kolmannen sukupolven aurinkopaneeliratkaisut ovat hitaasti saavuttamassa markkinakypsyys. Orgaanisen aurinkokennon (organic photovoltaic, OPV) valoherkkä materiaali koostuu yleensä puolijohtavista polymeereistä tai valoherkistä pienmolekyyleistä. Lähimpänä markkinapenetraatiota on Grätzel-kenno, toiselta nimeltään väriaineaurinkokenno (dye sensitised solar cells, DSSC). Väriaineaurinkokennon toiminta perustuu värimolekyylin ja puolijohdemateriaalin vuorovaikutukseen sekä elektrolyytin kykyyn kuljettaa varauksia. Väriaine on kiinnitetty erittäin huokoisen titaanidioksidin pinnalle. Väriaineet absorboivat näkyvää valoa, jota titaanioksidi taas ei absorboi. Valon virtittävästä väriainemolekyylistä siirtyy vapaa elektroni suoraan titaanioksidin johtavuusvyölle, josta se kulkeutuu ulkoiseen piiriin. Kennon elektrolyytin pelkistin-hapetinparit pelkistävät positiivisesti varautuneet väriainemolekyylit takaisin perustilalle. Ainakin yksi kennon elektrodeista pitää olla valoa läpäisevästä johtavasta materiaalista (transparent conducting material, TCO) [Angerer et al., 2009]. Toinen, platinalla pinnoitettu, toimii katodina. Väriaine pohjaa kaupallisissa ratkaisuissa ruteniumiin, joka luokitellaan kriittiseksi metalliksi. Myös muita väriaineita on tutkittu, mutta toistaiseksi ruteniumin avulla on saavutettu korkein hyötysuhde. Kaupallisissa ratkaisuissa Grätzel-kennojen hyötysuhde asettuu 2–4 %:iin. Toinen merkittävä kriteeri on väriaineen pitkäikäisyys. [Robertson, 2006]. Grätzel-kennojen materiaalin tarpeeksi on arvioitu 1 g/m^2 (Ag), $0,03 \text{ g/m}^2$ (Pt) ja $0,07 \text{ g/m}^2$ (Ru) [Angerer et al., 2009].

Keskittävässä aurinkokennoissa (concentrating photovoltaics, CPV) auringonsäteily keskitetään linssien avulla. Tällöin voidaan kohdistaa paneeleihin valoteho, joka vaihtelee muutamasta auringosta aina tuhanteen aurinkoon saakka. Paneeleiksi valikoidaan tyypillisesti hyvin korkean hyötysuhteen teknologiaa, kuten GaAs, jonka moduulihyötysuhde kaupallisissa ratkaisuissa on n. 25 % [EPIA, 2011]. Gallium on luokiteltu kriittiseksi mineraaliksi. Materiaalin tarpeeksi Fraunhofer ISI arvioi 37 g/kWp [Angerer et al., 2009].

KESKITTÄVÄ AURINKOVOIMA

Keskittäväällä aurinkosähköllä (concentrated solar power CSP) tarkoitetaan laitosta, joka keskittää saapuvan auringonsäteilyn linssien tai peilien avulla ja kohdistaa säteilyn systeemin polttopisteessä sijaitsevaan lämmönkeräimeen. Lämpöä johtavana aineena on tyypillisesti vesi, jokin öljy tai nestemäisessä muodossa oleva suolayhdiste. Kerätyllä lämmöllä tuotetaan höyryä, jolla tuotetaan konventionaalisessa turbiinilaitoksessa sähköä. Laitoksessa saattaa olla lisäenergianlähteenä kaasuturbiini, joka tuottaa sähköä silloin, kun auringon teho ei ole riittävä. CSP- laitokset jaotellaan sen mukaan, mitä konstruktioita auringon energian keskittämisessä käytetään. Paraboloidisessa kourussa lämmönkerääjä sijaitsee parabolin polttopisteessä. Tehokkaampi ja halvempi versio parabolisesta kourusta on lineaarinen

fresnel reflektori, joka pohjaa fresnel-linssien optiikkaan. Systeemin aperttuuri² kasvaa samalla, kun tarvittava peilipinta-ala ja siihen liittyvä materiaalin tarve pienenee. Aurinkotorni toimii siten, että peilit keskittävät auringonsäteilyn tornissa sijaitsevaan lämmönkerääjään.

Kaikille keskittävän aurinkovoiman ratkaisuille on yhteistä se, että peilipinnoissa käytettävä materiaali on hopea. Hopeaa käytetään siksi, että se heijastaa parhaiten valoa suhteessa toisiin metalleihin. Fraunhofer esittää arvioita hopean tarpeesta eri teknologioille: 7,57 kg/MW aurinkotorni, 3,75 kg/MW fresnel reflektori ja 13,75 kg/MW paraboloidinen kouru [Angerer et al., 2009].

3.1.2 Tuulivoima

Tuulivoimalakonseptit voidaan jakaa karkeasti vaihteellisiin ja vaihteettomiin. Vaihteistoja on 1-, 2- ja 3-portaisia. Tehonsäätö perustuu nykyisissä kaupallisissa laitoksissa lapakulman säätöön (pitch). Tuulivoimalaa voidaan käyttää joko vaihtelevalla tai kiinteällä roottorin pyörimisnopeudella [Polinder et al., 2007].

Tuulivoimalan generaattorin sähköteho on suhteessa sekä generaattorin pyörimisnopeuteen että vääntömomenttiin. Kasvattamalla joko pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia voidaan kasvattaa generaattorin tuottamaa sähkötehoa. Sähköisesti magnetoidut tahtigeneraattorit ja epätahtigeneraattorit suunnitellaan tavallisesti korkeammille pyörimisnopeuksille, vähintään 1 500 kierrosta minuutissa pyöriksi. Koska tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeus on alhainen, on alennusvaihteiston käyttö tässä konseptissa välttämätöntä. Sähköisesti magnetoidun generaattorin eduksi voidaan laskea se, että sen valmistukseen ei vaadita kriittisiä mineraaleja. Toisaalta haittapuolena on tarvittava alennusvaihteisto, joka saattaa helposti rikkoutua, vaatii huoltoa ja aiheuttaa siten kustannuksia ja seisokkeja.

Myös alennusvaihteettomia tuulivoimaloita on suunniteltu, joista esimerkkinä Enerconin laitokset. Koska generaattorin koko, tilavuus ja massa on kääntäen verrannollinen sen pyörimisnopeuteen, hitaasti pyörivät generaattorit ovat suurempia kuin nopeasti pyörivät generaattorit tietyssä teholuokassa.

Harvinaisiin maametalleihin perustuvilla kestopagneeteilla saadaan niiden painon ja kokoon nähden hyvin voimakkaita magneettikenttiä aikaiseksi. Koska kestopagneettigeneraattoreiden vääntö- ja tehotehdydet ovat suuria, ne voidaan suunnitella kompaktimmiksi kuin vastaavan tehoiset perinteiset generaattorit, esimerkiksi oikosulkugeneraattorit [Pippuri, 2013]. Kestopagneettitekniologiaa hyödyntämällä voidaan saavuttaa kohtuullisen kompakti koko myös matalammille pyörimisnopeuksille suunniteltaessa, mistä johtuen kestopagneettigeneraattorit ovat yleisiä vaihteettomissa tuulivoimaloissa. Erityisesti off-shore-ratkaisuissa,

² Apertuurilla tarkoitetaan pinta-alaa, jolle osuvan auringonsäteilyn laitos pystyy hyödyntämään energian tuotannossa.

joissa keskeistä on löytää mahdollisimman häiriö- ja huoltovapaa tekninen konsepti, vaihteettomuus on tärkeää.

Yli 1,5 MW:n kokoisissa laitoksissa yleistynyt käytäntö on vaihteleva pyörimisnopeus lapakulman säädöllä yhdistettynä 3-portaiseen vaihteistoon. Vaihtelevan pyörimisnopeuden etuna on korkeampi energiantuotanto verrattuna kiinteän pyörimisnopeuden laitoksiin, alhaisempi melutaso sekä korkeampi tuotetun sähkön laatu. Yleisimmin laitos käyttää sähköisesti magnetoitua generaattoria, mutta myös kestmagneettigeneraattoriin pohjautuvia ratkaisuja on. Tällöin mahdollisten verkkohäiriöiden yhteydessä laitoksen uudelleen käynnistäminen on vähemmän kompleksista, koska kestmagneettigeneraattori ei tarvitse käynnistyäkseen sähköä [Polinder et al., 2007].

Yleisin käytössä oleva kestmagneetti perustuu neodyymin seokseen (NdFeB). Neodyymin osuus magneetin painosta vaihtelee valmistajasta riippuen välillä 28–31 % [Moss, 2011]. Muita magneetissa esiintyviä harvinaisia maametalleja ovat dysprosium (osuus panosta 2–3 %) sekä pienessä määrin myös praseodyymi ja terbium [Buchert, 2011]. Vaikka neodyymin osuus painosta on suurin, saatavuuden kannalta dysprosium on kuitenkin kriittisin. Alhaisen pyörimisnopeuden vaihteettomissa tuulivoimakonsepteissa harvinaisten maametallien tarve on 160–200 kg/MW. Vastaavasti vaihteellisissa korkeamman pyörimisnopeuden laitoksissa harvinaisten maametallien tarve on 30 kg/ MW [Buchert, 2011].

Mielenkiintoisen potentiaalisen tulevaisuuden ratkaisun tarjoavat korkeissa lämpötiloissa suprajohtavat materiaalit (high temperature superconductors, HTS). Yttrium-barium-kuparioksidi eli YBCO on osoittautunut lupaavaksi suprajohtavaksi materiaaliksi, sillä se saavuttaa suprajohtavuuden 92 K:n lämpötilassa [Bine Informationsdienst, 2010]. Materiaalissa esiintyy harvinainen maametalli yttrium. Buchert arvioi harvinaisten maametallien menekiksi 2 kg/ MW [Buchert, 2011]. Tämän lisäksi kaapelin rakenteessa tarvitaan lantaania sekä ceriumia. Suprajohteet johtavat sähkövirtaa lähes häviöttömästi, jolloin voidaan sallia suurempia sähkövirrantiheyksiä kuin tavallisissa johteissa, esim. kuparissa. Suprajohtavuuden ansiosta on siten mahdollista tuottaa voimakkaita magneettikenttiä pienessä tilassa. Siten HTS-generaattori yhdistää kompaktiuden voimakkaisiin magneettikenttiin. Ensimmäinen 10 MW:n off-shore-prototyyppi SeaTitan on käytössä [Fischer, 2011]. Mikäli HTS-generaattori saavuttaa markkinakypsyyden, se saattaa haastaa vaihteettomissa tuulivoimaloissa toistaiseksi käytössä olevat kestmagneetteihin perustuvat sekä sähköisesti indusoidut generaattorit.

3.1.3 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Yksi keskeinen teknologia vähähiilisessä yhteiskunnassa on hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS, eli carbon capture and storage). Hiilidioksidin talteenotto-tekniikat voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- talteenotto savukaasuista pesurilla (esim. amiiniabsorptio)
- talteenotto happipolton avulla
- talteenotto polttoaineena käytettävästä kaasusta.

Tämän lisäksi kehitetään uusia lähestymistapoja, jotka toistaiseksi ovat vielä tutkimus- tai pilottiasteella. Näistä pisimmälle vietyjä ovat kehittyneet liuottimet, kiinteät sorbentit ja membraanit. Muita tutkimuskohteita ovat karbonaattijärjestelmät, metalli-orgaaniset järjestelmät, entsyymeihin perustuva erotus, ioniset nesteet sekä hapenkantajiin perustuva poltto ja kaasutus [Teir et al., 2011].

Kriittisiä mineraaleja esiintyy happipolttomenetelmän (oxyfuel) yhteydessä. Happipoltossa ilman sijasta polttoprosessissa käytetään puhtaan hapen ja kierrätetyn savukaasun sekoitusta. Savukaasu koostuu hiilidioksidista ja vedestä. Menetelmän ongelma on puhtaan hapen valmistus, joka on hyvin energiaintensiivistä, tällä hetkellä käytössä on kryogeeninen hapen erotus [Angerer et al., 2009]. Energiankulutusta pyritään pienentämään polymeerimembraaniteknologialla, joka on kehitysasteella [Cremer, 2007]. Johtuen Korkean lämpötilan (650–700 °C) ja höyrynpaineen (300–375 bar) takia korroosion vaara on suurempi kattilan pinnalla. Korroosiota estämään tarvitaan nikkelpohjainen pinnoite, kuten NiCr23Co12Mo. Pinnoitteissa esiintyy kriittiseksi luokiteltuja kobolttia ja molybdeeniä [Angerer et al., 2009].

CCS-infrastuktuuuri edellyttää lisäksi hiilidioksidin kuljetukseen liittyvää putkistoa tai säiliökuljetusta. Moss [Moss et al., 2011] on arvioinnut sekä putkistoon että voimalaitoksiin vaadittavaa teräksen kulutusta. Soveltuvat teräslaadut (API X65 ja API X100) sisältävät pieniä määriä molybdeeniä, niobiumia, kobolttia ja vanadiinia, jotka luokitellaan kriittisiksi.

Vattenfallin happipolttomenetelmää hyödyntävä pilottilaitos ”Schwarze Pumpe” on ollut toiminnassa Saksassa vuodesta 2008 [Strömberg et al., 2009].

3.1.4 Ydinvoima

Ydinvoima tarjoaa mahdollisuuden tuottaa sähköä hiilidioksidineutraalisti ja siten ydinvoima on myös otettu mukaan raportin tarkasteluihin. Ydinvoiman rakentamisessa tarvittavat kriittiset metallit riippuvat käytetystä teknologiasta. JRC on arvioinut Euroopassa yleisesti käytössä olevan reaktoriteknologian, kevytvesireaktorin, kriittisten metallien tarpeen. Arviot perustuvat kahden reaktorivalmistajan, Arevan ja Westinghousen, antamiin tietoihin [Moss et al., 2011].

Reaktorin eri komponenteissa käytetään metalliseoksia, joissa esiintyy kriittisiä metalleja, kuten molybdeeniä, hafniumia, niobiumia, reenumia, vanadiinia ja yttriumia. Lisäksi reaktorin säätösauvat voivat sisältää hopeaa ja indiumia. Vaihtoehtoinen materiaali säätösauvoille sisältää hafniumia. Taulukko 2 kokoaa tiedot [Moss et al., 2011].

Taulukko 2. Kevytvesireaktoriteknologiassa esiintyviä kriittisiä metalleja [Moss et al., 2011].

Metalli	Käyttötarkoitus	Arvioitu tarve
Mo	Ruostumaton teräs, eri reaktorikomponenteissa	70,8 kg/MWe
In	Säätösauvojen materiaali yhdessä hopean kanssa	1,6 kg/MWe
Ag	Säätösauvojen materiaali yhdessä indiumin kanssa	8,3 kg/MWe
Hf	Vaihtoehtoinen materiaali säätösauvoille, korvaa hopean ja indiumin	
V	Vahvistaa terästä	0,6 kg /MWe
Y	Teräs	0,5 kg/MWe

3.1.5 Biopolttonesteet

Biopohjaisiin polttonesteitä ovat erityisesti etanoli sekä biodiesel. Etanolia valmistetaan pääasiassa fermentoimalla sokeri- tai tärkkelyspitoista raaka-ainetta mikroorganismien avulla. Fermentoinnissa tarvittava sokeri vapautetaan lignoselluloosa-raaka-aineesta ensin kemiallisesti hydrolyysin avulla. Ensimmäisen sukupolven biodieseliksi kutsutaan rasvahappojen metyyliesteriä (FAME), jota voidaan valmistaa kasviöljyistä tai eläinrasvoista. Tällöin öljyeläinrasvojen ja kasviöljyjen rasvahapot vaihtoesteröidään metanolin kanssa viskositeetin ja kylmäominaisuuksien säätämiseksi [Sipilä, 2006]. Prosesseissa käytetään lähes yksinomaan homogeenisiä emäskatalyyttejä (natriumhydroksidi), eikä kriittisiksi luokiteltavia mineraaleja siten tarvita [Marchetti et al., 2007].

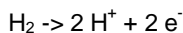
Toisen sukupolven biodieseliä, joka kemiallisen koostumuksensa puolesta ja ominaisuuksiltaan muistuttaa fossiilisista raaka-aineista valmistettua dieseliä, on mahdollista valmistaa ns. synteetikaasureitin kautta. Tällöin raaka-aineeksi soveltuisivat erilaiset puuraaka-aineet, kuten metsätähde sekä ruokohelpi ja turve. Prosessissa voidaan käyttää myös muuta kuin biomassapohjaisia raaka-aineita ja maailmassa on useita hiiltä tai maakaasua käyttäviä kaupallisia laitoksia. Prosessissa valmistetaan biomassasta ensin kaasuttamalla synteetikaasua, josta Fischer-Tropsch-menetelmällä saadaan korkealaatuista dieselpolttoainetta [Sipilä, 2006]. F-T prosessissa voidaan käyttää katalyyttinä rautaa, kobolttia tai ruteenia [Moss, 2011]. Nykyisin toimivat laitokset tuottavat F-T-prosessissa pitkiä hiilivetyjä, jotka krakataan valmiiksi polttonesteeksi. Rautakatalyytti tuottaa erityisesti lyhytketjuisia hiilivetyjä sekä runsaasti olefiineja ja happopitoisia yhdisteitä. Siksi rautaa käytetään kaupallisesti vain kemikaalien valmistukseen, eikä se sovellu dieseljakeen tuottamiseen. Sekä koboltti että ruteeni myrkyttyvät herkästi jo pienistä synteetikaasun epäpuhtauksista ja erityisesti rikki on poistettava alle ppm-pitoisuuksille pesuprosesseilla, joiden investointi- ja käyttökulut ovat korkeat. Ruteenipohjaiset katalyytit ovat vielä kobolttiakin herkempiä rikille. Lisäksi ruteeni itsessään on kallis materiaali. Vaikka ruteenikatalyyttien aktiivisuus on kobolttia parempi, niitä ei ole kaupallisissa laitoksissa pidetty kustannustehokkaina. Kaupallisissa dieseliä tuotta-

vissa laitoksissa on tällä hetkellä käytössä vain kobolttipohjaisia katalyyttejä. Koboltti on katalyytin aktiivinen metalli, mutta yleensä katalyytissä on promootorina³ esimerkiksi pieniä määriä reniumia tai ruteenia, jotka muun muassa parantavat kobolttin pelkistävyyttä oksidista metalliksi. Käytetty katalyytti kierrätetään, jolloin katalyytin arvokkaista metalleista noin 90 % saadaan uusiokäyttöön [Reinikainen, 2013].

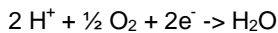
Koboltti ja ruteeni on luokiteltu kriittisiksi. Moss arvioi katalyytin tarpeeksi 6 kg kobolttia ja 0,12 kg ruteenia yhtä koe valmista polttonestettä kohden. Laskelmassa on oletettu katalyytin käyttöikäksi kymmenen vuotta [Moss et al., 2011].

3.2 Polttokennot ja energiavarastot

Polttokenno tuottaa sähköä vedystä ja hapestä sähkökemiallisen reaktion avulla. Polttoaine (yleensä vety) syötetään anodipuolelle, jossa vety hajoaa vapauttaen elektroneja:



Elektrolyytti on valittu siten, että ionit pystyvät liikkumaan siinä, mutta elektronit eivät. Ionit siirtyvät elektrolyytin läpi katodille, jonne myös elektronit johdetaan sähköjohdon kautta. Katodilla vetyionit, happi ja elektronit yhdistyvät jälleen ja syntyy lopputuotetta, vettä.



Polttokennoja on eri tyyppisiä, joita karakterisoivat elektrolyytinä toimiva aine, käytetty polttoaine sekä anodilla ja katodilla toimivat katalyytit [Alanen et al., 2003]. Tässä julkaisussa keskitytään energiasektorilla ja polttokennoautoissa käytettäviin teknologioihin. Raportin tarkastelujen ulkopuolelle jäävät siten suora metanolipolttokenno (direct methanol fuel cell DMFC), joka on kulutuselektronikassa esiintyvä ratkaisu sekä alkaalipolttokenno (alkaline fuel cell AFC), joka on avaruusteollisuuden ja sotateollisuuden käyttämä ratkaisu.

3.2.1 Polttokennot sähkön ja lämmön tuotannossa

3.2.1.1 Kiinteäoksidipolttokenno

Kiinteäoksidipolttokennossa (solid oxide fuel cell, SOFC) toimii kiinteä keraaminen yhdiste elektrolyytinä. Polttokennon toimintalämpötila on erittäin korkea, noin

³ Promoottori (tässä tapauksessa renium tai ruteeni) tukee varsinaisen katalyytin (koboltti) toimintaa.

600–850°C, minkä ansiosta polttokenno ei tarvitse platinaryhmään kuuluvaa katalyyttiä. Sähkön tuotannon hyötysuhde on noin 60 %, mutta mikäli laitos toimii CHP-tuotannossa, hyötysuhde nousee yli 90 %. Polttoaineeksi soveltuvat hiilivedyt, hiilimonoksidi ja vety [Himanen, 2013].

Kriittisistä mineraaleista esiintyy SOFC-kennoissa harvinaisia maametalleja lantaania, ceriumia ja yttriumia sekä lisäksi kobolttia. Elektrolyytinä toimii zirkoniumoksidi, johon on lisätty yttriumia (yttria-stabilised zirkonia YSZ). Sama YSZ-keramiikka muodostaa myös anodin yhdessä nikkelioksidin (NiO) kanssa. Nikkeli toimii katalyyttinä. Katodi on lantaania ja kobolttia sisältävä metalliyhdiste. Tämä lisäksi diffusionestokerros sisältää ceriumia sekä korroosionsuojapinnoite kobolttia. Taulukko 3 kokoaa Himasen arvion mukaisen kriittisten mineraalien tarpeen nyt ja tulevaisuudessa. Arvioissa on oletettu kennon tehotehyyden kasvavan nykyisestä arvosta 0,25 W/cm² aina arvoon 0,4 W/cm² asti.

Taulukko 3. Kriittisten metallien tarve SOFC-kennoissa nyt ja tulevaisuudessa [Himanen, 2013].

	Mineraalin tarve g/ kW	
	Nykytilanne	Tulevaisuus (5–10 vuotta)
Ce	2	0,1
La	20	4
Co	30	3
Y	40	10

3.2.1.2 Fosforihappopolttokenno

Fosforihappopolttokenno (phosphoric acid fuel cell, PAFC) on ensimmäisiä kaupallisessa käytössä olevia polttokennoja. Se käyttää vetyä polttoaineena ja sietää melko hyvin polttoaineessa esiintyviä epäpuhtauksia. Elektrolyytinä on huokoiseen piikarbidiin sidottu fosforihappo ja katalyyttinä sekä anodilla että katodilla platina tai platinan seosmetalli. PAFC-teknologiaa käytetään sähkölaitoksissa, mutta myös liikenteessä esim. busseissa on mahdollista hyödyntää PAFC-teknologiaa [Alanen et al., 2003].

Platina muodostaa merkittävän osan PAFC-kennon hinnasta. Sitä tarvitaan anodilla 2,4 g/kWp ja katodilla 5,2 g/kWp. Remick arvioi platinan määrän vähentämisen potentiaalin merkittäväksi. On väitetty, että tulevaisuudessa platinan tarve olisi verrattavissa PEM-polttokennojen platinan tarpeeseen, eli 0,03 g/kWp anodilla ja 0,13 g/kWp katodilla [Remick et al., 2009]. Vaikka on selvää, että uudet struktuurit tulevat merkittävässä määrin vähentämään platinan määrää polttokennossa, on silti vielä ennenaikaista arvioida tulevaisuuden tarvetta. [Ihonen, 2013]

3.2.1.3 Sulakarbonaattipolttokenno

Sulakarbonaattipolttokennon (molten carbonate fuel cell, MCFC) toimintalämpötila on melko korkea, 600–1000 °C, minkä vuoksi polttokennossa voidaan käyttää katalyyttinä edullista nikkeliä. MCFC-kennoja käytetään energiasektorilla sähkön tuotannossa sekä CHP-tuotannossa. Sähköntuotannon hyötysuhde on 50–60 % [Alanen et al., 2003].

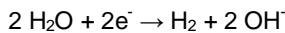
Elektrolyytinä on kemiallisesti inerti keraaminen litiumia sisältävä alumiinioksidi (LiAlO₂) sekä sula karbonaatti, tyypillisesti natriumkarbonaatti tai kaliumkarbonaatti. Kennossa ei esiinny kriittisiä mineraaleja [Steele & Heinzl, 2001].

3.2.2 Polttokennot ja vetyvarastot sähköautoissa

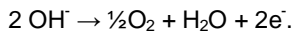
Polttokennoautot ovat yksi sähköautojen tyyppi. Tähän liittyvä PEMFC teknologia sekä vedynvarastointitekniologia käydään tarkemmin läpi luvussa 3.4.1.2

3.2.3 Elektrolyysi

Elektrolyysi on polttokennoon nähden käänteinen reaktio, ts. vedestä tuotetaan sähkövirran avulla vetyä. Mahdollisen vetytalouden käyttöönotto ja erityisesti polttokennoautojen yleistyminen edellyttävät teollisen mittakaavan vedyn tuotantoa. Katodilla syntyy vedestä sähkövirran avulla vetyä seuraavan pelkistymisreaktion mukaisesti:



Vastaavasti anodilla tapahtuu hapettuminen



Alkalielektrolyysi ja polymeerielektrolyysi ovat käytössä olevaa teknologiaa, jotka käydään alla tarkemmin läpi materiaalien näkökulmasta. Lisäksi tutkimusasteella on korkean lämpötilan vesihöyryelektrolyysi. Menetelmät eroavat toisistaan elektrolyytin sekä katalyyttien osalta.

3.2.3.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysi on perinteinen teknologia, joka on laajamittaisesti käytössä teollisessa vedyn tuotannossa. Elektrolyytinä toimii voimakkaasti alkalinen vesiliuos, joka yleensä pohjaa kaliumhydroksiin. Katodi ja anodi, jotka molemmat ovat nikkelillä päällystettyä terästä, on erotettu toisistaan ioneja läpäisevällä kalvolla.

Katalyytiksi soveltuu erilaisia materiaaleja [Zeng & Zhang, 2010], näistä kuitenkin yleisin on koboltti. Singhin kuvaamassa elektrolyysissä katalyytin (Co₃O₄) pitoisuus anodilla on 3,4 mg/cm² sekä katodilla 2,8 mg/cm², siis yhteensä 6,2 mg/cm² [Singh

et al., 2007]. Kun huomioidaan kobolttin ja hapen atomipainot, saadaan kobolttin tarpeeksi $4,6 \text{ mg/cm}^2$. Määrät voidaan ilmoittaa myös suhteessa kennon kuluttamaan sähkötehoon huomioiden alkalikennolle tyypillinen virran tiheys $0,3 \text{ mA/cm}^2$ [Kauranen, 2013], vedyn ja hapen erottamiseen tarvittava potentiaali $1,48 \text{ V}$ [Arico, 2013] sekä tämän ylitse menevä potentiaali, joka Singhin et al. kuvaamassa kennossa on $224\text{--}235 \text{ mV}$. Näistä tiedoista saadaan laskettua kennon kuluttama sähköteho, joka on $0,5 \text{ W/cm}^2$ ja siten kenno sisältää kobolttia suhteutettuna kennon tarvitsemaan sähkötehoon $8,9 \text{ mg/W}$. Kennon käyttämä sähköteho on verrannollinen vedyn tuotannon nopeuteen.

3.2.3.2 Polymeerielektrolyysi

Polymeerielektrolyysi edustaa uudempaa teknologiaa, joka soveltuu erityisesti aurinko- ja tuulivoimaloiden yhteyteen. Laitokset ovat kooltaan pienempiä, ja ne pystyvät toimimaan vaihtelevalla tehotasolla.

Elektrolyytinä toimii kiinteä polymeerikalvo, joka johtaa protoneita [Arico et al., 2013]. Katalyyttinä toimivat platinaryhmän metallit, anodilla ruteeni ja iridium sekä katodilla platina. Tällä hetkellä ei ole tiedossa PGM-ryhmän ulkopuolisia metalleja, jotka soveltuisivat polymeerielektrolyysin katalysaattoriksi [Arico et al., 2013]. Katalyytin tarve on noin 2 mg/cm^2 anodilla sekä $0,5 \text{ mg/cm}^2$ katodilla [Kauranen, 2013]. Metallin tarvetta on mahdollista pienentää ottamalla käyttöön kantajastruktuuri, jossa nanokoluokassa oleva katalyytti sijaitsee kantajametallin, esimerkiksi nikkelin, pinnalla.

Polymeerielektrolyysikemno tarvitsee $1,6 \text{ V}$:n jännitteen [Arico et al., 2013] tyypillisen virrantiheyden ollessa $0,3 \text{ A/cm}^2$ [Kauranen, 2013]. Siten kennon käyttämä teho on $0,5 \text{ W/cm}^2$. Kemno toimii 93% :n hyötysuhteella (veden pilkkomiseen käytetty potentiaali $1,48 \text{ V}$ suhteessa kennon yli menevään potentiaaliin). Jalometallien määrää tuotettua tehoa kohtaan voidaan vähentää nostamalla virrantiheyttä, mutta samalla hyötysuhde heikkenee. Mikäli tuotetulle lämmölle on hyötykäyttöä, tämä on helpompi hyväksyä.

3.2.4 Vetyvarastot stationäärisissä ratkaisuisissa

Perinteinen tapa vedyn varastointiin on sen paineistaminen noin 200 bar :iin teräksisiin kaasupulloihin tai terässäiliöihin. Uudempaa teknologiaa edustavat hiilikuitukomposiittisäiliöt mahdollistavat 800 baarin paineen. Tällöin vedyn osuus varastossa voi nousta jopa $13 \text{ painoprosenttiin}$ [Züttel, 2007]. Suuressa mittakaavan varastoinnissa kyseeseen voivat tulla vanhat suolakaivokset, kaasukentät, pohjavesiesiintymät tai kallioluolat. Paineistetun vedyn varastointi ei edellytä kriittisiä mineraaleja [Kauranen et al., 2013].

Nestemäisen vedyn säilyminen edellyttää tyhjiöeristettyä säiliötä, jotka valmistetaan ruostumattomasta teräksestä ja alumiinista. Ongelmaksi nousee suuri energian tarve, vedyn nesteyttäminen kuluttaa noin 30% vedyn energiasisällöstä. Lisäksi tankin jäähdytys ja pitäminen $21,2 \text{ K}$:n lämpötilassa vaatii jatkuvasti energiaa. Myös korkealaatuisista säiliöistä höyrystyy vetyä muutaman prosentin päivässä [Züttel, 2007].

Vetyä on mahdollista varastoida myös vetyrikkaiden kemiallisten yhdisteiden muodossa. Tällaisia ovat esim. synteettinen metaani, metanoli, ammoniakki, muuraishappo ja dimetyylieetteri. Etuina voidaan pitää vedyn suurta massaosuutta yhdisteessä ja helppoa käsiteltävyyttä, mutta haittana on huono konversiosuhde [Kauranen et al., 2013].

Vety liukenee atomaarisessa muodossa metalliyhdisteiden hilaan. Vedyn massaosuus varaston painosta jää noin kahteen prosenttiin. Mahdollisia metalliyhdisteitä on monia, ja yhdisteestä riippuen liukenemiseen vaadittava vedyn lämpötila ja paine vaihtelevat. Huoneenlämmössä ja normaalipaineessa toimivia ovat mm. AB₅-hydridit, kuten LaNi₅. Lantaani luokitellaan kriittiseksi mineraaliksi [Züttel, 2007].

Adsoptiota hyväksi käyttäen voidaan vetyä varastoida myös erilaisten aineiden pinnalle. Tällöin kyseeseen tulevat suuren pinta-alan omaavat hillinanoputket ja metallo-orgaaniset yhdisteet (MOF). Varastot vaativat nestetyypen lämpötilan, vedyn osuus varaston painosta jää noin kahteen painoprosenttiin [Züttel, 2007].

3.2.5 Muut energiavarastot

Redoksivirtausakut

Redoksivirtausakku perustuu hapetus-pelkistysreaktioon ja se varastoi sähköenergiaa kemiallisesti suolojen muodossa. Toisin kuin normaaleissa akuissa redoksivirtausakussa on kaksi elektrolyyttiä, jotka virtaavat suljetussa kierrossa varaston ja kennon välillä. Tähän viittaa myös termi "virtaus". Kennossa tapahtuu elektrolyyttien välillä varauksen vaihtoa ioneja läpäisevän membraanin läpi. Sähkön varastointikapasiteetti määräytyy elektrolyytin varaston koon mukaan ja teho määräytyy kennojen lukumäärän ja rakenteen mukaan. Järjestelmän kokoluokka voi vaihdella välillä 5–500 MW. Eri suoloja on tutkittu, mm. ZnBr, VBr tai NaBr, mutta lähimpänä markkinakypsyyttä on vanadiiniin perustuva redoksivirtausakku [Alanen et al., 2003].

Vanadiini-redoksivirtausakku

Vanadiinin etu muihin mahdollisiin suoloihin nähden on erityisesti siinä, että se voi esiintyä neljällä eri hapetusluvulla. Siten vanadiini voi muodostaa sekä positiivisen (V^{5+}/V^{4+}) että negatiivisen (V^{3+}/V^{2+}) elektrolyytin. Muiden suolojen kohdalla esiintyvää ongelmallista elektrolyytin sekoittumista ei siis voi vanadiini-redoksivirtausakussa tapahtua. Tämä estää akun vikaantumista, nostaa sen huoltovarmuutta ja tekee siitä pitkäikäisen [Angerer et al., 2009]. Akun energiatiheys on alhainen, Angerer arvioi elektrolyytin tarpeeksi 2,92 kg/kWh [Angerer et al., 2009]. Kennolla on nopea vaste ja varastointiaika voi vaihdella sekunneista kymmeniin tunteihin. Akku soveltuu siten erityisesti aurinko- ja tuulienergian yhteyteen vaihtelevaa sähköntuotantoa tasoittamaan.

Vanadium luokitellaan kriittiseksi mineraaliksi.

3.3 Sähköverkko

Yhteiskunnan energiahuollon painopisteen siirtyminen enenevässä määrin kohti sähköä johtaa tarpeisiin kehittää ja laajentaa olemassa olevaa sähköverkkoa. Hajautettu uusiutuviin energialähteisiin pohjaava energiantuotanto lisää hiilineutraaliutta ja energian tuotannon omavaraisuutta, mutta asettaa myös haasteita sähköverkon kehittämisen osalta. Aikaisempi selkeä jako sähkön tuottajiin ja kuluttajiin muuttuu, kun jatkossa myös pientuottajien määrä kasvaa.

3.3.1 Super grid

Super grid viittaa Euroopan laajuiseen sähkönsiirtoverkkoon, joka mahdollistaa uusiutuvan energian tuotannon siellä, missä se on kustannustehokkainta sekä sähkönsiirron pitkien etäisyyksien päähän kuluttajien ja teollisuuden saataville. Sähköntuotanto pohjautuisi erityisesti offshore-tuulivoimaan, mutta myös aurinkoenergia, vesivoima, biomassa ja sähkön varastointitekniologiat ovat osa super gridiä [Friends of the Supergrid, 2013]. Eri hahmotelmia super gridistä on laadittu, mm. saksalainen DENA II [Deutsche Energieagentur, 2010], ENTSO-E:n Ten year Network Development Plan 2010 [ENTSO-E, 2010] ja Skotlannin, Pohjois-Irlannin sekä Irlannin yhteinen ISLES-raportti [ISLES, 2012].

Ilmakaapeleina käytetty HVAC-kaapelit sisältävät johtavana materiaalina kuparia tai alumiinia tai molempia metalleja [Friends of the Supergrid, 2013]. Merikaapeleiden merkitys kasvaa toisaalta merituulivoiman kautta mutta myös mahdolliset merialueet ylittävien yhteyksien vuoksi, kuten Välimerellä tai Pohjanmerellä. Merikaapelit voivat perustua HVAC- tai HVDC-tekniologiaan. Sähköä johtava materiaali on kuparia tai alumiinia. Suojaavana kuorena käytetään perinteisesti lyijyä, joskin myös muovin perustuvia ratkaisuja on [Moss et al., 2011]. Korkean lämpötilan suprajohtavilla kaapeleilla on mahdollista siirtää suuria määriä sähköä kompaktisti ja pienillä häviöillä. Kaapeleiden haittapuolena ovat kuitenkin suprajohtavuuden edellyttämä jäähdytys sekä lämpöeristyksen tarve. Siksi kaapeleiden käytön uskotaan rajoittuvan kaupunkialueille, missä sähkön tarve on suurta, sähkönsiirtoon käytettävissä oleva tila rajallista ja siirtoetäisyydet pieniä [Moss et al., 2011]. Suprajohtavissa kaapeleissa esiintyy kriittiseksi luokiteltuja metalleja. Käytössä olevassa toisen sukupolven suprajohtavassa aineessa, YBCO:ssa, esiintyy yttriumia. Lisäksi kaapelien rakenteessa tarvitaan lantaania ja ceriumia [Lewis & Müller, 2007].

3.3.2 Smart grid

Aikaisempi selkeä jako sähkön tuottajiin ja kuluttajiin muuttuu hajautetun sähköntuotannon myötä, kun rinnalle tulevat tuottaja-kuluttajat, ts. verkkotoimijat, jotka voivat toimia sekä sähkön tuottajina että kuluttajina. Tässä tapauksessa energivirrat kulkevat kahteen suuntaan. Hajautetussa tuotannossa sähköntuotanto tyypillisesti vaihtelee paljon sääolosuhteiden mukaan. Tämä korostaa sähkön varastoinnin

merkitystä (distributed energy storage systems DESS) samoin kuin sähkön kysyntäjoustoa (demand side management DSM). Nykyinen verkkorakenne kykenee vastaanottamaan pienessä määrin vaihtelevaa tuotantoa, mutta mikäli uusiutuvien energialähteiden osuutta halutaan merkittävässä määrin kasvattaa, tarvitaan verkon hallintaan älykkäitä ratkaisuja [Giordano et al., 2011, 2011].

Älykäs verkko edellyttää verkon toimijoiden seurantaan sekä näiden välistä viestintää. Reaaliaikaisen kulutuksen seurannan (smart metering) on havaittu johtavan sähkön kulutuksen pienenemiseen. Joustavat AC-siirtojärjestelmät (FACTS, Flexible AC Transmission Systems) ovat tehoelektroniikkaa, joka mahdollistaa verkon optimoinnin eri tasoilla. Osoitinmittauslaite (PMU, phasor measurement unit) monitoroi systeemiä seuraamalla mittauspisteessä sähköjännitteen faasia ja korkeutta. Asentamalla PMU:n useampaan mittauspisteeseen on mahdollista hallita verkkoa dynaamisesti. Valvomo-ohjelmisto (SCADA, supervisory control and data acquisition) on ollut osa verkon hallintaa jo pidempään [Giordano et al., 2011].

ICT-teknologian lisääntyvä käyttö sähköverkon ohjauksessa vaatii telekommunikaatiossa ja elektroniikkateollisuudessa käytettyjä metalleja, kuten kriittisiksi luokiteltuja puolijohteita indium, gallium ja germanium. Määrien on kuitenkin arvioitu olevan niin pieniä, ettei niillä ole merkitystä metallin markkinoiden kannalta [Moss et al., 2011].

3.4 Sähköä käyttävät teknologiat

3.4.1 Sähköautot

Sähköautot jaetaan karkeasti ottaen täyssähköautoihin ja hybridautoihin. Täyssähköauto tulee toimeen pelkällä sähkömoottorilla, kun taas hybridauto tarvitsee sähkömoottorin ohella myös polttomoottorin. Rinnakkaishybridissä voimansiirto voi tapahtua sekä sähköisesti että mekaanisesti. Vastaavasti sarjahybridissä ajo tapahtuu aina sähkömoottorin avulla. Lataushybridi on auto, johon tuodaan ulkopuolelta energiaa sekä polttoaineen että sähkön muodossa. Polttokennoauto on sarjahybridi, jolla on sähköinen voimansiirto. Vetyä käyttävä polttokenno lataa auton akustoa [Nylund, 2011]. Akkuteknologiaan perustuvia sähköautoja kehittävät Nissan ja Renault. Polttokennoautoja kehittävät Toyota, Daimler, Hyundai, KIA, Honda sekä Nissan [Laurikko, 2012].

3.4.1.1 Moottori

Ajoneuvoteknologiassa käytetty sähkömoottori perustuu kestomagneetteihin. Keskeinen kriteeri on ajoneuvon keveys ja kompaktius. Kestomagneetteihin pohjaavan moottoritekniikan etu on sen korkeampi tehotehous ja siten alhaisempi paino ja tilan tarve verrattuna perinteiseen induktiomoottoriin. Nykyisin käytössä olevat moottorit ovat neodyymipohjaisia (NdFeB), vastaavia laitteita käytetään tuulivoimaloissa generaattoreina. Neodyymi on merkittävin harvinainen maametalli kestomagneetissa, jossa esiintyy lisäksi dysprosiumia parantamassa magneetin

lämmönkestävyyttä sekä vähäisessä määrin praseodyymiä, terbiumia ja galliumia. Taulukko 4 esittää arvioita harvinaisten maametallien menekille jaotteleamalla sähköautot karkeasti kahteen kokoluokkaan: tehot alle 50 kW ja yli 50 kW.

Taulukko 4. Sähkösäädin harvinaisten maametallien tarve kahdessa kokoluokassa. Metallin tarve on ilmoitettu yhtä säädintä kohden [Buchert et al., 2011].

	< 50 kW g	> 50 kW g
Nd	150	360
Pr	50	120
Dy	90	210
Tb	9	21
Ga	0,435	1

Mahdollisesti NdFeB pohjaisten säadinten tilalle voisi tulevaisuudessa tulla myös kyseeseen SmCo kestomagneettina [Angerer et al., 2009].

3.4.1.2 Polttokenno ja vetyvarasto

Polttokennoauton energianlähteenä toimii vety. Polttokennoja on käsitelty laajemmin luvussa 3.2, joten tässä keskitytään sähköautoissa käytettävään polttokennoratkaisuun, protonivaihtokalvopolttokennoon PEMFC (proton exchange membrane fuel cell). Elektrolyytinä on protoniä johtava fluoripohjainen polymeeri (PFSI perfluorosulfonic acid ionomer). Kriittiseksi luokitellun fluorin tarve on noin 40 g /100 kWp [Ihonen, 2013].

Sekä anodi- että katodipuolella katalyyttinä käytetään platinaa. Nanomuodossa oleva platina sijaitsee hiilikantajan päällä, jonka koko on noin 20–30 nm. Platinapartikkelin koko on 20–40 Å. Katalyysireaktio tapahtuu katalysaattorin pinnalla ja siten on tärkeää saavuttaa mahdollisimman suuri pinta-ala suhteessa volyyymiin. Näin voidaan vähentää tarvittavan platinan määrää itse reaktion kuitenkään tästä kärsimättä [Ihonen, 2013]. Tällä hetkellä platinan katodi- ja anodipuolen yhteenlaskettu platinan tarve on 0,6–0,7g/kW. Jos oletetaan henkilöauton keskimääräiseksi tehoksi 75 kW, tämä tarkoittaa noin 50 g platinaa autoa kohden [Kauranen, 2013].

Yhdysvaltojen energiaviranomainen DOE (Department of Energy) on asettanut tavoitteeksi vähentää platinan kulutus 0,2 g/kW vuoteen 2015 mennessä. Tähän on olemassa erilaisia keinoja [Brouzgou et al., 2012]

- Platina on mahdollista korvata osittain muilla metalleilla, kuten palladiumilla tai ruteniumilla. Myös muita kuin jalometalleja tutkitaan (wolframi, nikkeli, rauta, kupari, metallikarbiitit, nitriitit, oksidit).
- Siirtymällä uudenlaisiin hiilikantajiin, joiden nanokokoluokassa oleva pinta-rakenne mahdollistaa platinalle korkeamman ominaispinta-alan ja siten sen

aktiivisuus kasvaa. Stabiilisuus paranee myös, jolloin suorituskyky muuttuu vähemmän. Koska suorituskyky kennon eliniän lopussa määrittää tarvittavan platinan määrän, voidaan täten platinaa vähentää.

- Platinan elektronirakennetta on mahdollista muuttaa katalysaattorin erityisellä rakenteella. Katalysaattorin ytimen muodostaa tällöin jokin muu metalli, kuten kulta, ja platina sijaitsee ytimen pinnalla (core/shell-rakenne).

Ruteniumia voidaan lisätä katalyyttinä anodipuolelle, käytäntö mahdollistaa ns. likaisen vedyn käytön polttoaineena. Likainen vety sisältää pieniä määriä hiilimonoksidia ja rikkiä epäpuhtauksina. Ruteniumin ongelma on kuitenkin liukeneminen syklisessä käytössä erityisesti käynnistämisen yhteydessä, mikä johtaa polttokennon toiminnan heikkenemiseen. Ruteniumin lisääminen on järkevää, mikäli ajoneuvoa ajetaan harvemmin, mutta kerralla pidempiä matkoja. Tämä on mahdollista työkoneissa ja busseissa, joissa voi myös olla pieni typpisäiliö, jolla ratkaistaan käynnistyksen aiheuttamaa liukenemisongelmaa [Ihonen, 2013].

Vedyn varastointiin käytetty teknologia perustuu paineistettuun vetykaasuun. Vety paineistetaan noin 700 baariin ja komprimointi kuluttaa 15 % vedyn sisältämästä energiasta [von Helmholtz, 2007]. Vetytankille on olemassa eri materiaaliratkaisuja, näihin kuuluvat teräs ja alumiini, mahdollisesti lisättyinä lasi- tai hiilikuiduilla [Eberle et al., 2012]. Kriittisiä mineraaleja ei esiinny.

3.4.1.3 Akusto

Akustoa karakterisoi keskeisesti energian varastointikyky (Wh/kg) sekä tehon luovutuskyky (W/kg). Muita merkittäviä tekijöitä ovat turvallisuus, kestävyys (lataus- syklien määrä) ja latausvirta [Nylund, 2011].

Täyssähköautoissa keskeinen vaatimus koskee akun energianvarastoimiskapasiteettia, tällöin valinta on litium-ioniakusto. Autonomisissa hybridautoissa tarve kohdistuu ensisijaisesti tehon vastaanotto- ja luovutuskykyyn, tällöin vallitseva akkuteknologia on NiMH-akut. Myös hiiliperusteiset kaksikerroskondensaattorit, eli niin sanotut superkondensaattorit (electric double-layer capacitor EDLC) saattavat tulla kyseeseen hybridautoissa.

Litiumioniakut

Litium on kevyin olemassa oleva metalli ja siksi litiumioniakkujen energiatiheys on verraten korkea, 130 Wh/kg. Muita litiumioniakkujen etuja ovat korkea hyötysuhde sekä pitkäikäisyys [Alanen et al., 2003]. Litiumioniakuissa on kolme pääkomponenttia: positiivielektrodi, negatiivielektrodi sekä elektrolyyttinä toimiva neste. Kullekin komponentille on olemassa eri toteutusvaihtoehtoja, lisäksi komponentteja voidaan yhdistellä eri tavoin. Negatiivielektrodi on tyypillisesti hiilipohjainen (grafiitti tai koksi) tai koostuu litiumtitanaatista (LTO). Positiivielektrodina toimii jokin litiumpohjainen metallioksidi (kobolttia sisältävä LCO, nikkeliä, mangaania ja kobolttia sisältävä NMC tai nikkeliä, mangaania ja alumiinia sisältävä NCA) tai rautafosfaatti LFP [Calstart, 2010]. Elektrolyyttinä toimii litiumioneja sisältävä neste. Tämän

hetken kaupalliset autosovellukset perustuvat NMC/grafiitti-ratkaisuun, mutta jatkossa pääpaino siirtynee positiivielektrodin osalta LFP:hen. Yksi vaikuttava tekijä taustalla on kobolttin saatavuuteen ja hintaan liittyvät kysymykset [Vuorilehto, 2013]. Kobolttin tarpeesta NMC-akussa on esitetty erilaisia arvioita: 240–390 g/kWh [Vuorilehto, 2013] ja 490 g/kWh [Konietzko & Gernuks, 2011]. LFP-ratkaisu ei sisällä kobolttia.

Nikkelimetallihydridi-akut, NiMH

NiMH-akkujen energiatiheys on alhainen, 50 Wh/kg. Tätä kompensoi korkea tehonluovutuskyky, yli 1000 kW/kg [Conte, 2006]. Siten NiMH-akut soveltuvat hybridi-autoihin. Positiivielektrodi on nikkelioksidia ja elektrolyytinä toimii KOH-liuos. Negatiivielektrodina on metallihydridi, jonka koostumus voi vaihdella sisältäen harvinaisia maametalleja tai muita metalleja sekä vetyä. Metallihydridi vapauttaa tai sitoo vetyä toimintasyklinsä aikana. Koppera esittelee eri metallihydridien tyyppit sekä vaihtoehdot metalleille [Kopera, 2004]. Autosovelluksissa yleisimmin käytössä on AB₅ metallihydridi, jossa A on harvinaisia maametalleja sisältävä metalliyhdiste, nk. "Mischmetal" ja B voi olla nikkeliä, kobolttia, mangaania tai alumiinia [Kopera, 2004]. Råde arvioi harvinaisten maametallien tarpeeksi 1,2 kg/kWh sekä tulevaisuuden tarpeeksi 0,85 kg/kWh [Råde & Andersson, 2001]. Tyypillinen yhdiste on La_{5,7}Ce_{8,0}Pr_{0,8}Nd_{2,3} [Fetchenko et al., 2007].

Superkondensaattorit

Superkondensaattorissa, toiselta nimeltään kaksoiskerroskondensaattorissa, energia varastoituu kahden hiilielektrodin väliseen sähkökenttään. Elektrodimateriaalina toimii aktiivihilli, aktiivihilikuitu tai hiiliaerogeeli [Alanen et al., 2003]. Elektrolyytti on orgaaninen liuos. Kondensaattori on pakattu alumiinikuoreen [Lämmel et al., 2013]. Kriittisiä mineraaleja ei esiinny.

3.4.1.4 Tehoelektroniikka ja ohjausjärjestelmä

Tehoelektroniikkayksikkö ja siihen liittyvä ohjausjärjestelmä ohjaavat virtaa akustolle ja siitä pois. Se muuttaa akun tasasähkön moottorille sopivaksi vaihtovirraksi. Jarrutettaessa moottori toimii generaattorina ja tehoelektroniikka ohjaa näin syntyneen virran takaisin akkuun. Verkosta tapahtuvaa latausta varten autossa on kiinteä laturi, joka muuttaa verkkovirran akulle sopivaksi tasavirraksi [Nylund, 2011].

Tehoelektroniikka sisältää pienissä määrin palladiumia, kultaa, germaniumia ja indiumia. Hopeaa käytetään kontaktimetallina. Painossa mitattuna kupari on merkittävin tarvittava raaka-aine [Buchert et al., 2011].

3.4.1.5 Auton ulkopuolinen latauspiste

Sähköauton latauspisteitä on kahta perustyyppiä. Hitaan latauksen yhteydessä (tyhjentyneen akuston lataaminen kestää 6–10 tuntia) auto kytketään 16 A:n yksi-

3. Kriittisiä metalleja sisältäviä vähähiilisiä energiateknologioita

vaiherasiaan. Suomessa yleisiä lohkolämmitinpistorasioita voidaan tietyin edellytyksin hyödyntää tähän tarkoitukseen. Pikalatausasemilla sähkön tasasuuntaaja on auton ulkopuolella [Nylund, 2011].

Kuparin ohella tulee latauspisteen elektroniikka vaatimaan hopeaa, galliumia, indiumia ja germaniumia. Taulukko 5 koostaa metallien tarpeen [Buchert et al., 2011].

Taulukko 5. Kriittisten mineraalien tarve sähköautojen tehoelektroniikassa, kaapeloinnissa sekä latauspisteessä.

	Tehoelektroniikka		Kaapelit		Latauspiste	
	< 50 kW	> 50 kW	< 50 kW	> 50 kW	Hidas lataus	Pikalatausasema
	g	g	g	g	g	g
Pd	0,064	0,08				
Au	0,16	0,2				
Ag	4	6	1	1	0,001	0,001
Ga	0,03	0,05			0,001	0,001
Ge	0,03	0,05			0,001	0,001
In	0,03	0,05			0,001	0,001

3.4.2 Valaistus

Valaistus on yksi merkittävä yksittäinen sähköenergian käyttökohde niin kotitalouksissa kuin palvelusektorillakin. Samoin kehittyvissä talouksissa sähkönkulutus kasvaa erityisesti sähköisen valaistuksen käyttöönoton myötä.

Perinteinen hehkulamppu muuttaa tyypillisesti vain n. 5 % siihen viedystä energiasta valoksi. Hehkulampan ohelle on kehitetty energiatehokkaampia ratkaisuja [Savolainen, 2008]. Halogeenilamppu on hehkulamppu, joka sisältää pieniä määriä halogeenia, kuten jodia tai bromia. Hehkulanka on volframia, mutta halogeenikaasun ansiosta hehkulangasta irtoava volframi palautuu takaisin langalle. Siten lampua voidaan käyttää korkeammassa lämpötilassa kuin tavallista hehkulamppua, ja tällöin lampun valoteho ja siten myös energiatehokkuus paranee hehkulamppuun nähden noin 20 %. Kriittiseksi luokiteltavia metalleja halogeenilamputta ei ole.

Fluoresenssiin pohjaavia energiatehokkaita valaistusratkaisuja edustavat loistelamput, LED-teknologia sekä orgaaniset LEDit. Fluoresenssissa aineen molekyyli absorboi fotonin ja emittoi lyhyen viiveen jälkeen uuden fotonin. Fluoresoivan aineen emittoiman fotonin aallonpituus on aineesta riippuvainen, siten ilmiön avulla on mahdollista vaikuttaa valonlähteen säteilemän valon spektriin valitsemalla fluoresoivat aineet halutulla tavalla [Tähkämö, 2013].

Eri alkuaineita on tutkittu fluoresenssiin liittyen, ja erityisesti joidenkin harvinaisten maametallien on todettu soveltuvan hyvin valaistukseen johtuen sopivista

väriominaisuuksista sekä energiatehokkuudesta [Schüler et al., 2011]. Dysprosium (Dy^{3+}) lähettää keltaista valoa, cerium (Ce^{3+}) vihreää, europium sinistä (Eu^{2+}) tai punaista (Eu^{3+}), terbium (Tb^{3+}) vihreää valoa [Riedel et al., 2007]. Valkoista valoa saadaan yhdistelemällä eri aallonpituuksia. Fotoneja emittoivan aktivaattorin lisäksi tarvitaan kantajastruktuuri, joka joissakin tapauksissa sisältää lantaania (La) tai yttriumia (Y) [Ronda, 1995]. A. Wojtalewicz-Kasprzak käy läpi väitöskirjatyössään valaistusteknologiassa käytössä olevia eri loisteaineita. Osa näistä ei sisällä harvinaisia maametalleja, ja on siten käytössä halvoissa loistelamppuvalaisimissa [Wojtalewicz-Kasprzak, 2007]. Jüstelin mukaan kuitenkin harvinaisiin maametalleihinkin perustuvat ratkaisut ovat ominaisuuksiltaan ylivoimaisia [Jüstel, 2007].

Loistelamput voidaan jakaa kotitalouksissa yleisiin pienloistelamppuihin (compact fluorescent lamp CFL) sekä toimistoissa yleisiin kaksikantaisiin loistelamppuihin (linear fluorescent lamp LFL). CFL-lampuissa tyypillisesti käytetty loisteaine on Calcium Tungstate (CAT), jota kuluu noin 1,5 g lamppua kohden. Loisteaine sisältää seuraavia harvinaisia maametalleja: La, Ce, Eu, Tb, ja Y pääpainon ollessa ceriumilla (20 %) ja yttriumilla (62 %). LFL lampuissa on käytössä Lanthanum Phosphate (LAP), joka sisältää samoja harvinaisia maametalleja kuitenkin siten, että pääpaino on lantaanilla (22 %) ja yttriumilla (62 %) [U.S. Department of Energy, 2011].

LED (light emitting diode) on valoa lähettävä puolijohdeyhdiste, ja sen toiminta perustuu siten elektroluminesenssiin. Valon aallonpituus ja siten väri riippuu käytetystä materiaalista, joista useimmat pohjaavat galliumiin tai indiumiin. Valaistusratkaisuihin tarkoitetuissa LED-lampuissa halutaan tuottaa valkoista valoa. Siten puolijohdeen lähettämä monokromaattinen valo hajotetaan eri aallonpituuksille yllä kuvattujen loisteaineiden avulla. Yleisin käytössä oleva puolijohde on InGaN, joka emittoi sinistä aallonpituutta. Fraunhoferin tutkimusten mukaan puolijohdemateriaalin tarve on 0,17 mg indiumia ja 0,53 mg galliumia yhtä LED-lamppua kohden. Loisteaine sisältää ceriumia ja yttriumia (Ce^{3+} :YAG) [Tanabe et al., 2005]. DOE:n arvion mukaan yhtä 12,5 W LED-lamppua kohden tarvitaan 1 g loisteainetta [Scholand, 2012]. Huomioiden loisteaineen kemiallinen koostumus voidaan laskea kriittisten mineraalien tarpeeksi lamppua kohden 0,7 mg Ce ja 450 mg Y [Masui et al., 2011].

Alalla nähdään, että markkinat tulevat siirtymään asteittain enemmän kohti LED teknologiaa, joiden uskotaan muodostavan vuosina 2020–2030 jo merkittävä osan valaisinmarkkinoista [Tähkämö, 2013]. Vaikka valaisinta kohdin tarvittava puolijohdemateriaalin määrä (InGaN) on pieni, kertautuu kuitenkin materiaalin tarve markkinoiden kasvaessa. Siksi kehitteillä on korvaavia ratkaisuja, jotka perustuvat joko piihin (Si) tai sinkkioksidiin (ZnO). Samoin harvinaisten maametalien käyttö fosforina saattaa tulla tarpeettomaksi. Kehitteillä on teknologia, jossa valoa emittoivan puolijohdeen pinnalle levitetään ohut kerros kadmiumia ja seleeniä. Kerrokseen muodostetaan kvanttipisteitä. Alla olevan puolijohdeen lähettämä sininen valo purkautuu ulos kvanttipisteistä muuttuen samalla valkoiseksi valoksi [Zissis & Kitsinelis, 2009]. Lisäksi orgaanisiin ledeihin (OLED) perustuva teknologia ei tarvitse kriittisiä mineraaleja [Moss et al., 2011].

4. Kriittiset metallit

Aiemmin mainitusta EU:n kriittisiä metalleja koskevasta raportista on tässä selvityksessä poimittu ne metallit, joilla on vihreiden energiatekniologioiden näkökulmasta merkitystä. Listaa on vielä täydennetty hopealla, telluurilla ja litiumilla, joita ei EU:n mukaan ole luokiteltu kriittisiksi, mutta joilla on aurinkoenergiatekniikan sekä akkuteknologian kohdalla merkitystä. Mikäli aurinkosähkön kysyntä merkittävässä määrin tulevaisuudessa laajenee, on myös telluurin ja hopean osalta odotettavissa saatavuusongelmia. Samoin sähköautojen merkittävä markkinaosuuden kasvu toisi lisää kysyntää litiumille.

Alla käydään läpi metallit, niiden geologisia varantoja koskevat tiedot, metallien sovelluskohteet vihreässä energiatekniologiassa sekä kilpailevat markkinat. Harvinaisten maametallien ja platinaryhmän metallien osalta keskitytään ainoastaan niihin metalleihin, joilla on käyttökohteensa vihreissä energiatekniologioissa.

4.1 Telluuri

Telluurin (Te) löysi vuonna 1782 Transilvaniassa kultakaivoksen yhteydessä F.-J. Mueller von Reichenstein. Uusi alkuaine nimettiin maan mukaan (lat. tellus = maa). 1960-luvulta lähtien telluurin käyttö on kasvanut merkittävästi, alun perin metallurgiassa sekä termoelektrisissä sovelluksissa. Telluuri on puolijohde, jonka sähkönjohtavuus hieman kohoaa valon vaikutuksesta. Se on lievästi myrkyllinen ja sisäisesti nautittuna se aiheuttaa hengitykseen epämiellyttävän hajun. Telluuri on yksi maankuoren harvinaisimmista alkuaineista.

Taulukko 6 kokoaa yhteen telluurin ominaisuuksia [Emsley, 2011].

Taulukko 6. Telluuri.

Nimi	Telluuri
lat. nimi	Tellurium
lyhenne	Te
järjestysluku	52
luokka	puolimetalli
löytämivuosi	1782
väri	Hopeanharmaa
pitoisuus maankuoressa	0,005 ppm

Telluurin vuosituotannon arvioiminen on hyvin vaikeaa johtuen joidenkin maiden puutteellisesta raportoisesta. Tiedoissa on huomioitu ainoastaan kupariesiintymien sisältämä telluuri. Tämän lisäksi telluuria saadaan talteen kultaesiintymien sekä lyijy- ja sinkkiesiintymien yhteydessä [USGS, 2013b], [USGS, 2012a]. Taulukko 7 kokoaa yhteen telluurin varantotiedot.

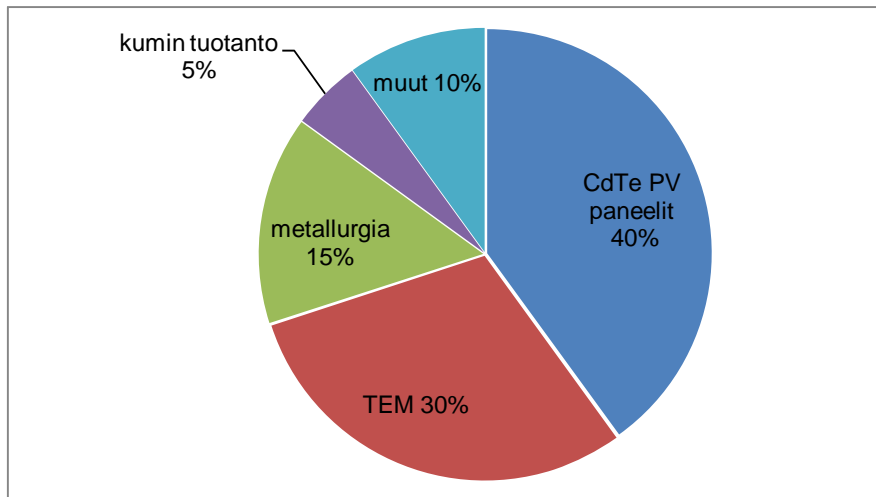
Taulukko 7. Telluurin geologiset esiintymät [USGS, 2013b].

mineraalivarannot	N/A
malmivara	24 000 t (ei sisällä Venäjän varantoja)
vuotuinen tuotanto	N/A

Telluurin merkittävin markkina on CdTe-aurinkosähköpaneelien valmistus 40 %:n osuudella. Kilpailevista markkinasegmenteistä tärkeimpiä ovat termoelektristen elementtien⁴ valmistus (termoelectric modules TEM, 30 %). Metalliseoksista tärkein valmistuksen lisäksi telluuria seostetaan kupariin sen lastuamisominaisuuksien parantamiseksi sekä lyijyyn parantamaan vahvuutta. Raakakumin vulkanointiprosessiin lisätty telluuri lisää kumin lämmönkestävyyttä [STDA]. Kuva 4 kokoaa yhteen telluurin markkinatilanteen.

⁴ Termoelektrinen elementti perustuu puolijohteisiin. Se toimii kuten lämpöpumppu: kun elementtiin syötetään sähköä, se siirtää lämpöä elementin yhdeltä puolelta toiselle puolelle.

4. Kriittiset metallit



Kuva 4. Telluurin markkinoiden jakautuminen 2013 [STDA]. TEM viittaa termoelektriseen elementtiin.

4.2 Indium

Indiumin (In) löysivät vuonna 1863 saksalaiset kemistit F. Reich ja T. Richter. Uusi alkuaine löytyi sinkin tuotannon yhteydessä. Spektroskopiassa aine tuottaa indigon värisen sinisen spektriviivana, mihin myös viittaa nimitys indium. Viime vuosikymmenen alussa indiumin havaittiin stabiiloivan metalleja. 1950-luvulta lähtien indiumia on käytetty LED-valojen tuotannossa. Toisessa maailmansodassa indiumia käytettiin lentokoneiden laakereiden pinnoitteena. Indiumille ominaista on kimeä ääni, joka syntyy kun puhdasta metallia taivuttaa. Jotkin indiumin yhdisteet ovat puolijohtavia. Maankuorella indium on 69. yleisin alkuaine. Taulukko 8 kokoaa indiumin keskeisiä ominaisuuksia [Emsley, 2011].

Taulukko 8. Indium.

Nimi	Indium
lat. nimi	Indium
Lyhenne	In
Järjestysluku	49
Luokka	Metalli
Löytämivuosi	1863
Väri	Hopeanharmaa
pitoisuus maankuorella	0,052 ppm ¹

¹) [Rudnick & Gao 2003]

Valtaosa indiumin tuotannosta saadaan sinkkikaivosten sivutuotteena, pieni osa tinan ja kuparin tuotannon yhteydessä. Yli puolet tunnetuista indiumvarannoista sijaitsevat Kiinassa muiden tuottajamaiden ollessa USA, Kanada, Peru sekä Venäjä. Taulukko 9 kokoaa tiedot indiumin varannoista.

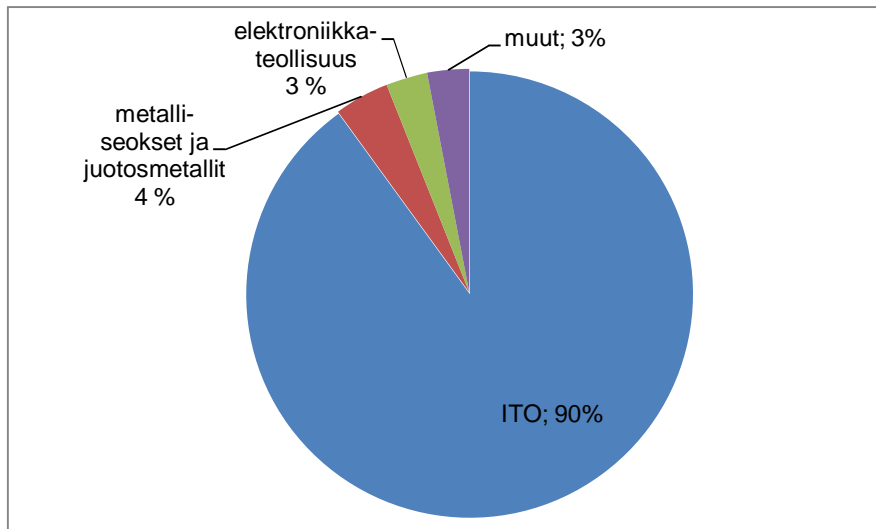
Taulukko 9. Indiumin geologiset esiintymät [USGS, 2013c], [USGS 2008].

mineraalivarannot	16 000 t
malmivara	11 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	670 t

Vihreässä energiateknologiassa indiumin merkittävin markkina on CIGS-aurinko-sähköpaneeliteknologiassa. Tämän lisäksi tulevaisuudessa kysynnän kasvua on odotettavissa LED-valojen sekä sähköautojen tehoelektronikan ja latauspisteen elektronikan myötä. Myös sähköverkon kehitys verkon ohjauksen osalta (smart grid) lisää indiumia sisältävän elektronikan kysyntää. Kilpailevista markkinasegmenteistä tärkein on ITO⁵ (indium tinaoksidi) 90 % markkinaosuudella. ITO:ta käytetään litteiden näyttöjen valmistuksessa. Muita käyttökohteita ovat metalliseokset ja juotosmetallit (4 %), sekä puolijohdekomponentit elektroniikkateollisuudessa (3 %). Elektroniikkateollisuus pitää sisällään myös aurinkopaneelien sekä LED-valaisimien valmistuksen. Muut käyttökohteet (3 %) pitävät sisällään mm. indiumin käytön akkuteknologiassa sekä ydinvoimaloiden säätösauvoissa. Kuva 5 havainnollistaa indiumin markkinatilannetta. [Polinares, 2012.]

⁵ ITO indium-tinaoksidi on läpinäkyvä sähköä johtava materiaali.

4. Kriittiset metallit



Kuva 5. Indiumin markkinatilanne [Polinares, 2012]. ITO viittaa indium-tinaoksidiin.

4.3 Gallium

Venäläinen kemisti ja alkuaineiden jaksollisen järjestelmän kehittäjä D. Mendelejev ennusti galliumin (Ga) olemassaolon vuonna 1871. Neljä vuotta myöhemmin ranskalainen kemisti P.E.L. de Boisbaudran varmensi oletuksen spektroskopialla. Nimi gallium viittaa de Boisbaudranin kotimaahan. Gallium sulaa käden lämmössä (sulamispiste on 30 °C). Sen ensimmäiset käyttökohteet liittyivätkin lämpötilojen mittaamiseen sekä metalliseoksiin, joilla on alhainen sulamispiste. 1960-luvulta lähtien puolijohde-elektroniikka on muodostanut galliumin merkittävimmän käyttöalueen. Maankuoressa gallium on 34. yleisin alkuaine. Taulukko 10 kokoaa keskeiset galliumin tiedot [Emsley, 2011].

Taulukko 10. Gallium.

nimi	Gallium
lat. nimi	Gallium
lyhenne	Ga
järjestysluku	31
luokka	muut metallit
löytämivuosi	1875
väri	Hopeinen
pitoisuus maankuoressa	16 ppm ¹

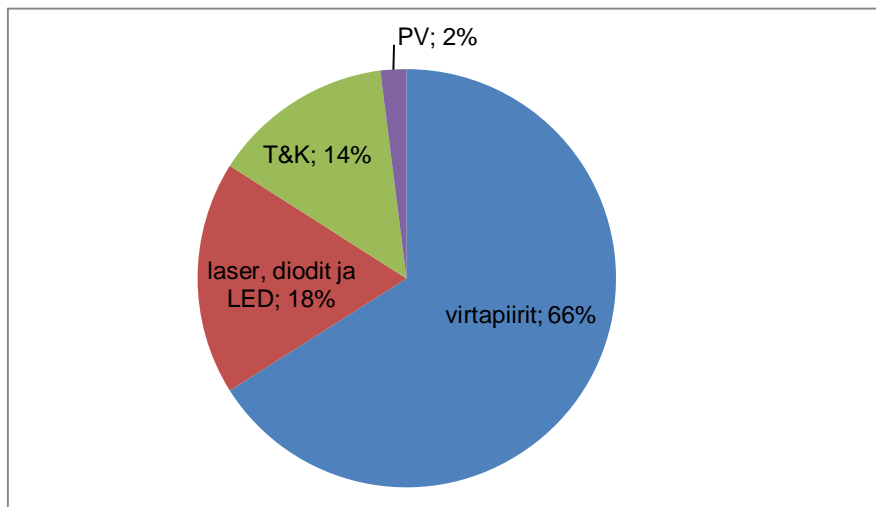
¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Galliumin kokonaistuotanto vuonna 2012 oli USGS:n arvion mukaan 354 tonnia, josta primäärituotannon osuus on 273 tonnia ja loput kierrätettyä materiaalia. Valtaosa primäärituotannosta syntyy bauksiitin prosessoinnin yhteydessä ja pieni osa on peräisin sinkkikaivoksista. Myös hiiliesiintymien yhteydessä saattaa olla galliumia. Kiina, Saksa, Kasakstan ja Ukraina ovat johtavia galliumin tuottajia. Vain pieni osa bauksiitin ja sinkkiesiintymien sisältämästä galliumista on mahdollista saada eroteltua. USGS:n arvion mukaan varantoarviot eivät siten ole luotettavia. Galliumin vuotuinen tuotanto vaihtelee seuraten alumiinin markkinoita [USGS, 2013d]. Taulukko 11 kokoa galliumin varantotiedot.

Taulukko 11. Galliumin geologiset esiintymät [USGS, 2013d].

mineraalivarannot	N/A
malmivara	N/A
vuotuinen tuotanto	273 t (vuonna 2012)

Vihreässä energiateknologiassa galliumia käytetään CIGS-aurinkopaneelien puolijohdemateriaalina, joissakin LED-tekniikoissa sekä sähköautojen elektroniikka-komponenteissa. Myös sähköverkon kehittäminen (smart grid) tulee lisäämään verkon ohjaukseen tarvittavaa elektroniikka, mikä lisää galliumin kysyntää. 98 % galliumista käytetään puolijohdesovelluksissa joko GaAs- tai GaN-muodossa. Näistä GaAs on 95 %:n markkinaosuudella tärkeämpi [Moskalyk, 2003]. Galliumin puolijohdesovelluksia käytetään mm. mikropiireissä, optoelektronikassa ja aurinkopaneeleissa. Muita käyttökohteita ovat mm. metalliseokset ja lääketieteen sovellukset. Kuva 6 esittää GaAs:n markkinatilannetta.



Kuva 6. GaAs-markkinat, [Angerer et al., 2009].

4.4 Germanium

Germaniumin (Ge) olemassaolon ennusti vuonna 1869 D. Mendelejev. Kaksi vuosikymmentä myöhemmin saksalainen C. Winkler varmisti uuden alkuaineen olemassaolon, tästä johtuu myös nimi germanium. Puhdas germanium on puolijohde, ja puolijohde-elektroniikan sovellukset valmistettiin alkuaikoina germaniumista. Nykyisin pii on korvannut suurelta osin germaniumin. Germanium on maankuoren 52. yleisin alkuaine. Taulukko 12 kokoaa germaniumin keskeisiä ominaisuuksia [Emsley, 2011].

Taulukko 12. Germanium.

nimi	germanium
lat. nimi	germanium
lyhenne	Ge
järjestysluku	32
luokka	puolimetalli
löytämisvuosi	1886
väri	hopeanvalkoinen
pitoisuus maankuoressa	1,3 ppm ¹

¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

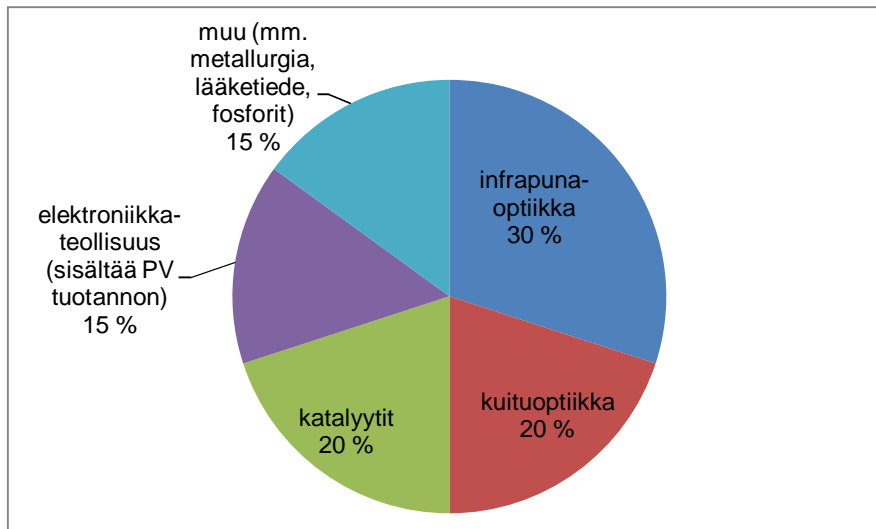
Germaniumia saadaan pääasiallisesti sinkkikaivosten sivutuotteena. Tämän lisäksi germaniumia tuotetaan hiilen polton yhteydessä syntyvästä lentotuhkasta. Noin 30 % vuotuisesta germaniumin tuotannosta oli vuonna 2010 kierrätettyä materiaalia. Germaniumin merkittävimmät tuottajat ovat Kiina ja Kanada [USGS, 2012b]. Taulukko 13 esittää germaniumin varantotietoja.

Taulukko 13. Germaniumin geologiset esiintymät [USGS, 2013e]. Vuotuinen tuotanto viittaa maailmanlaajuiseen tuotantoon. Tiedot varannoista koskevat vain USA:ta.

mineraalivarannot	N/A
malmivara	450 000 t (USA)
vuotuinen tuotanto (2012)	128 000 t

Vihreässä energiateknologiassa germaniumia käytetään a-Si-ohutkalvopaneelien valmistukseen parantamaan paneelien sähköntuotannon stabiiliutta. Myös energiatehokkaissa lampuissa käytettävissä loisteaineissa on joissakin tapauksissa germaniumia. Tämän lisäksi germanium on merkittävä raaka-aine elektroniikkateollisuudessa ja siten sen kysyntä tulee kasvamaan mm. sähköautojen merkityksen kasvaessa sekä sähköverkon kehityksen myötä (smart grid). Alla oleva kuva il-

mentää germaniumin markkinoita. Infrapunaoptiikka on 30 %:n osuudella merkittävin markkina. Kuituoptiikka ja katalyyttinen käyttö muodostavat kumpikin 20 %:n markkinaosuuden. Elektroniikkateollisuus, johon on laskettu ohutkalvopaneelin tuotanto mukaan, vastaa 15 % osuudesta. Muihin kohteisiin kuuluvat loisteaineiden lisäksi mm. germaniumin käyttö lääketieteessä ja metallurgiassa. Kuva 7 havainnollistaa germaniumin markkinoita.



Kuva 7. Germaniumin markkinatilanne vuonna 2011 [USGS, 2012b].

4.5 Hopea

Hopea (Ag) on ollut ihmiskunnan käytössä jo esihistorialliselta ajalta lähtien vanhimpien arkeologisten löytöjen sijoituessa noin 5 000 vuoden taakse. Perinteisesti hopeaa on käytetty koruissa, astioissa sekä sakraaliesineissä, mutta 700 e.Kr. lähtien sillä on ollut myös monetaarinen funktio. Hopean antiseptinen ominaisuus on tunnettu jo Hippokrateen ajoista lähtien, ja yksi hopean markkinoista löytyy edelleenkin lääketieteestä. Hopeahalidit ovat valoherkkiä, ja siten perinteinen valokuvaus on perustunut hopean käyttöön. Digitaalitekniikan myötä tämä käytösektori on vähenemään päin. Metalleista hopealla on korkein sähkönjohtavuus, jonka vuoksi sillä on lukuisia sovelluksia elektroniikkateollisuudessa [Ludwig & Wermusch, 1988].

Taulukko 14 kokoaa hopean keskeisimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 14. Hopea.

nimi	hopea
lat. nimi	argentum
lyhenne	Ag
järjestysluku	47
luokka	siirtymämetalli
löytämisvuosi	esihistoria
väri	hopea
pitoisuus maankuoressa	0,055 ppm ¹ [Rudnick & Gao 2003]

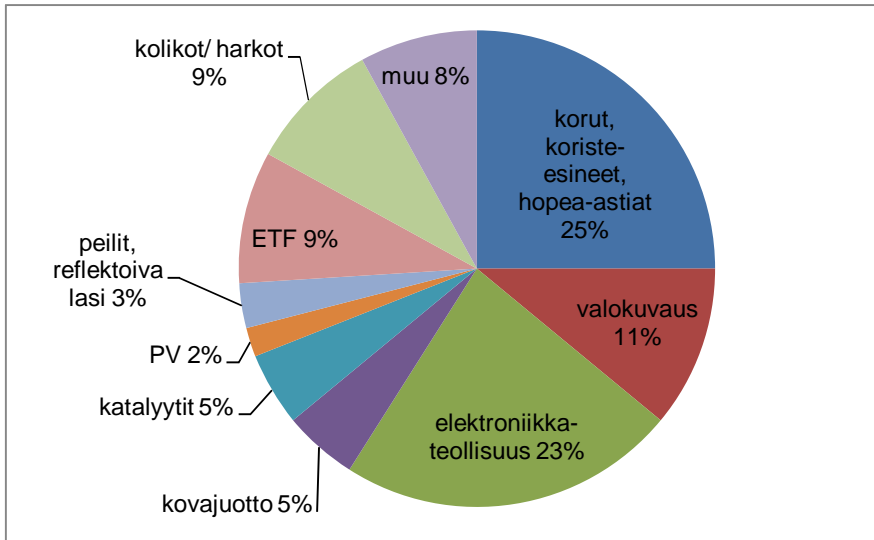
¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Noin 30 % hopean tuotannosta on peräisin hopeakaivoksista, muut sivutuotteena kultakaivoksissa (12 %), lyijy- ja sinkkikaivoksissa (34 %), kuparikaivoksissa (23 %). Taulukko 15 kokoaa hopean varantotietoja.

Taulukko 15. Hopean geologiset esiintymät [USGS, 2013f].

mineraalivarannot	N/A
malmivara	540 000 t
vuotuinen tuotanto	24 000 t (vuonna 2012)

Vihreässä energiateknologiassa hopeaa käytetään c-Si-aurinkopaneelien sekä Grätzel-kennojen sähköisen kontaktin luomisessa hopean ensiluokkaisen sähkönjohtavuuden vuoksi. Keskittävissä aurinkovoimalaitoksissa hyödynnetään hopean hyviä heijastusominaisuuksia peilipinnoissa. Kilpailevista markkinasegmenteistä tärkeimpiä ovat elektroniikkateollisuus 23 %:n markkinaosuudella, hopeakorujen ja astioiden valmistus (25 %) sekä monetääriäinen käyttö (kolikot, harkot, ETF, yhteensä 18 %) [Fortis Bank Nederland, VM Group, 2010]. Kuva 8 kokoaa hopean käyttökohteet markkinasegmenteittäin.



Kuva 8. Hopean markkinatilanne vuonna 2011 [Fortis Bank Nederland, VM Group, 2010].

4.6 Harvinaiset maametallit

Harvinaisiin maametalleihin (rare earth elements, REE) lasketaan kuuluvaksi 17 metallia: 15 lantanoidi ryhmään kuuluvaa metallia sekä skandium ja yttrium. Metallit jaotellaan painon mukaan keveisiin maametalleihin (light rare earth elements, LREE: La-Sm) sekä painaviin maametalleihin (heavy rare earth elements HREE: Eu-Lu). Vihreissä energiateknologioissa käytetään keveistä maametalleista lantaania, ceriumia, praseodyymia, neodyymia ja europiumia sekä painavista maametalleista terbiumia ja dysprosiumia. Myös yttriumia käytetään vihreissä energiateknologioissa. Taulukko 16 kokoaa yhteen kyseiset harvinaiset maametallit [Emsley, 2011].

Taulukko 16. Vihreissä energiateknologioissa esiintyvät harvinaiset maametallit.

nimi	yttrium	lantaani	cerium	praseodyymi
lat. nimi	yttrium	lanthanum	cerium	praseodymium
lyhenne	Y	La	Ce	Pr
järjestysluku	39	57	58	59
luokka	siirtymämetalli	lantanoidit	lantanoidit	lantanoidit
löytämivuosi	1794	1839	1803	1885
väri	hopeisen valkoinen	hopeisen valkoinen	teräksen harmaa	hopeisen valkoinen
pitoisuus maankuoressa	20 ppm ¹	20 ppm ¹	43 ppm ¹	4,9 ppm ¹

4. Kriittiset metallit

nimi	neodyymi	europium	terbium	dysprosium
lat. nimi	neodymium	europium	terbium	dysprosium
lyhenne	Nd	Eu	Tb	Dy
järjestysluku	60	63	65	66
luokka	lantanoidi	lantanoidi	lantanoidi	lantanoidi
löytämivuosi	1885	1896	1843	1886
väri	hopeisen valkoinen	hopeisen valkoinen	hopeisen valkoinen	hopeisen valkoinen
pitoisuus maankuoressa	20 ppm ¹	1,1 ppm ¹	0,6 ppm ¹	3,6 ppm ¹

¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Nimestään huolimatta harvinaiset maametallit ovat melko yleisiä maankuoressa. Ensimmäinen harvinaisia maametalleja sisältämä mineraali löytyi vuonna 1787 Ruotsista Ytterbyn kaivoksesta. Koska metallit ovat kemiallisten ominaisuuksien puolesta hyvin lähellä toisiaan, kesti yli sata vuotta, ennen kuin viimeinenkin ryhmään kuuluva metalli löydettiin. Samaisesta syystä johtuen metallit voivat korvata toisiaan mineraalin kristallistruktuurissa, ja siksi harvinaisia maametalleja sisältävissä mineraaleissa esiintyykin usein monia metalleja [BGS, 2011b].

Merkittävimmit harvinaisten maametallien esiintymät keskittyvät Kiinaan, Pohjois-Amerikkaan, Australiaan sekä Grönlantiin. Länsimaiden kireän ympäristölainsäädännön takia kaivostoiminta on 2000-luvulla keskittynyt Kiinaan, mikä on johtanut länsimaiden riippuvuuteen Kiinan tuotannosta ja viennistä. Viime vuosina onkin erityisesti Pohjois-Amerikassa ja Australiassa käynnistetty uudestaan kaivostoimintaa, mutta tästä huolimatta 86 % maailman tuotannosta oli Kiinasta peräisin vielä vuonna 2012 [USGS, 2013g]. Taulukko 17 kokoaa kaikkien harvinaisten maametallien varantotietoja.

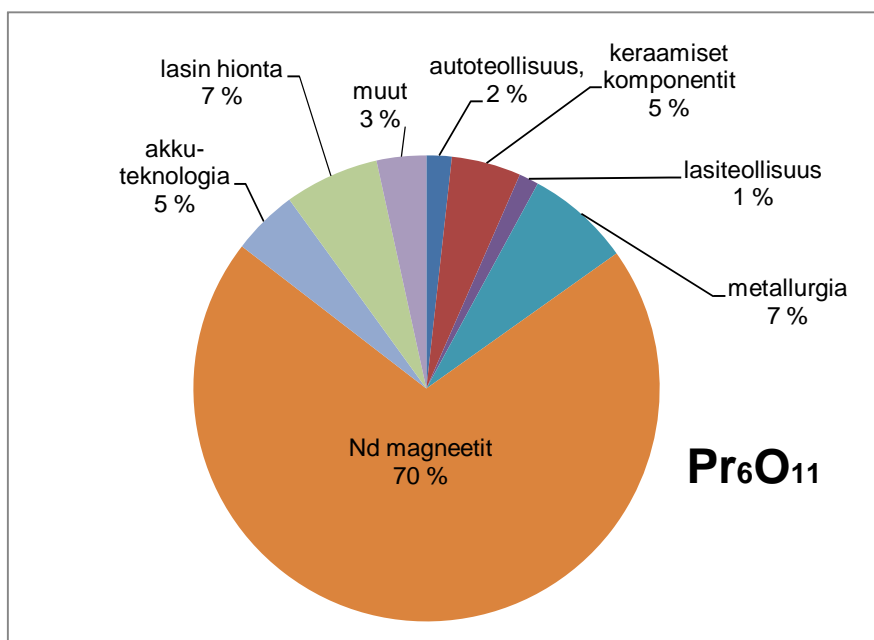
Taulukko 17. Harvinaisten maametallien geologiset esiintymät [USGS, 2013g].

mineraalivarannot	N/A
malmivara	110 000 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	110 000 t

Neodyymi ja praseodyymi ovat voimakkaasti magneettisia, siksi niiden merkittävin sovellusalue löytyykin kestopagneeteissa. Kestomagneetteihin pohjautuva generaattori- ja moottoriteknologia on hyvin kompaktia verrattuna perinteiseen induktioon pohjaavaan teknologiaan. Siksi kestopagneetteja on käytössä tuulivoimaloissa, samoin sähköautojen moottoriteknologia pohjaa kestopagneetteihin. Molempien sektoreiden osalta on odotettavissa voimakasta kasvua. Muita vihreisiin energiateknologioihin lukeutuvia käyttökohteita ovat NiMH-akut, joissa esiintyy

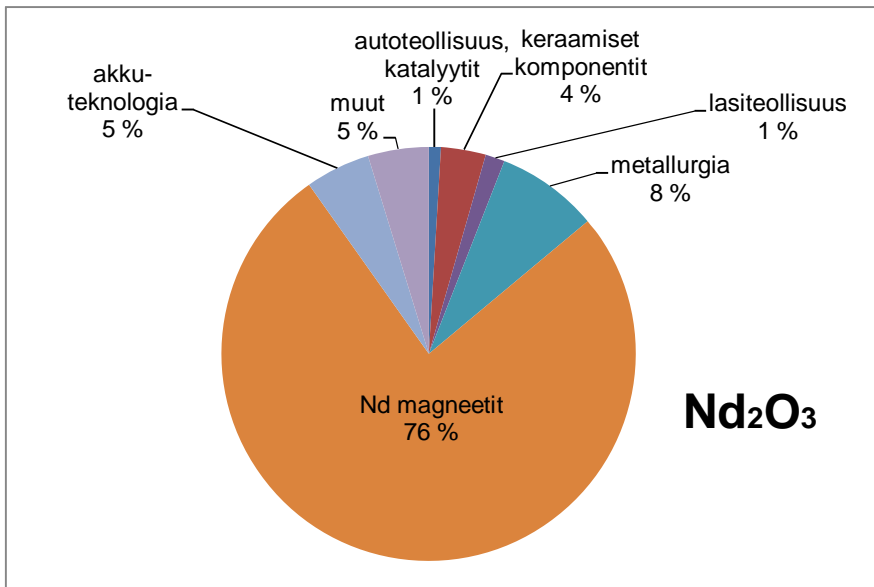
lantaanin ja ceriumin ohella myös pieniä määriä neodyymiä ja praseodyymiä. Energiatavokkaan valaistuksen (LED-lamput ja loisteputket) fosforiaineet saattavat sisältää pieniä määriä harvinaisia maametalleja, erityisesti yttriumia, mutta myös ceriumia, europiumia, lantaania ja terbiumia. Mahdollinen tulevaisuuden teknologia liittyy korkean lämpötilan suprajohdeisiin. Suprajohdavan kaapelin rakenne sisältää yttriumia, lantaania ja ceriumia. Vihreiden energiategnologioiden ohella kilpailevia markkina-alueita ovat mm. lasi- ja keramiikkateollisuus, missä harvinaisia maametalleja käytetään muokkaamaan materiaalin optisia ominaisuuksia sekä antamaan materiaalille väriä. Metallurgiassa harvinaisia maametalleja tarvitaan alumiinin, raudan ja teräksen seoksiin antamaan metalliseokselle haluttuja ominaisuuksia. Muita sovelluskohteita löytyy mm. avaruusteollisuudesta, puolustusteollisuudesta sekä kemianteollisuudesta [Goonan, 2011].

Alla olevista piirakkakaavioista (Kuva 9–Kuva 13) käyvät ilmi eri harvinaisten maametallien käyttökohteet sekä näiden suhteelliset osuudet metallikohtaisesti. Kuvista puuttuvat europium, jonka markkina koostuu kokonaisuudessaan fosforiaineista sekä terbium, jonka kulutuksesta noin 10 % kohdistuu kestomagneettien tuotantoon ja loput fosforiaineisiin [Goonan, 2011].

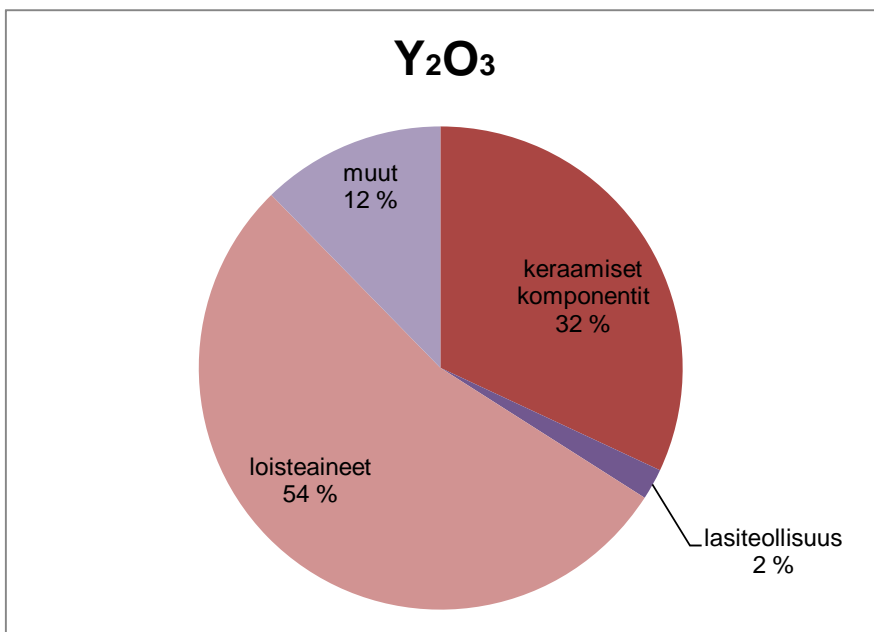


Kuva 9. Praseodyymin markkinaosuudet [Goonan, 2011].

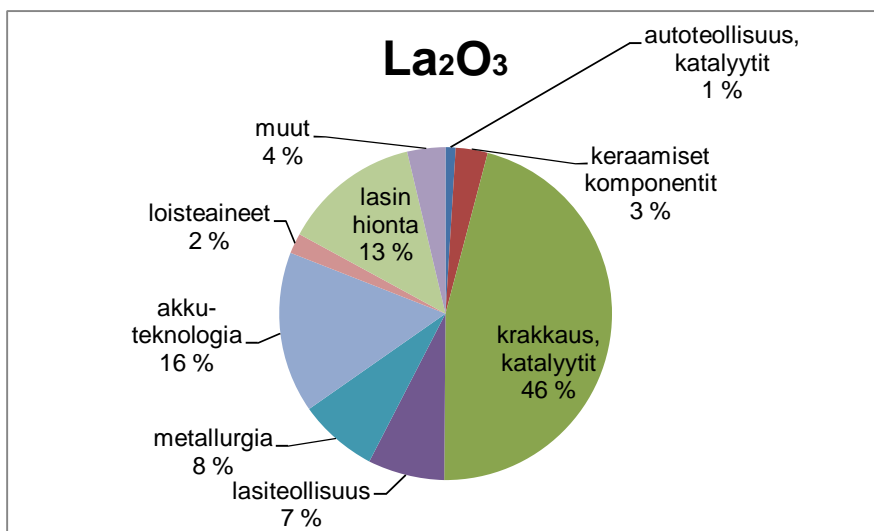
4. Kriittiset metallit



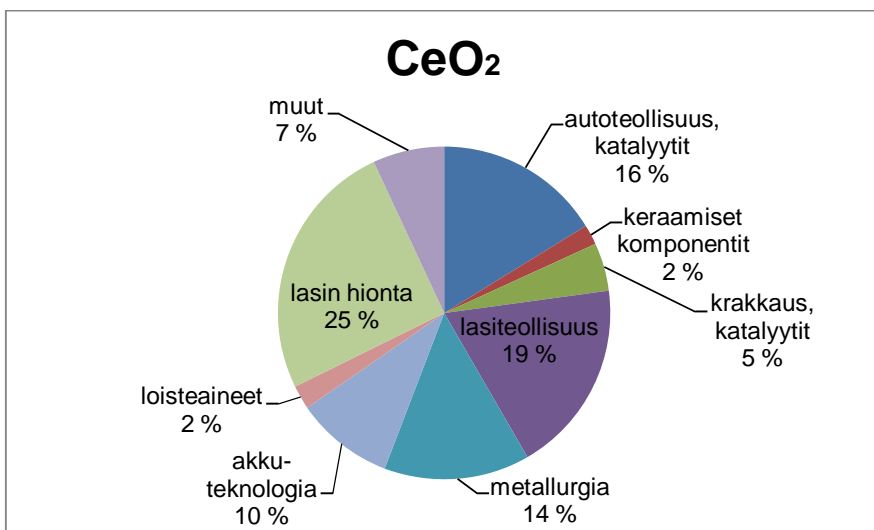
Kuva 10. Neodyymin markkinaosuudet [Goonan, 2011].



Kuva 11. Yttriumin markkinaosuudet [Goonan, 2011].



Kuva 12. Lantaanin markkinaosuudet [Goonan, 2011].



Kuva 13. Ceriumin markkinosuudet [Goonan, 2011].

4.7 Litium

Litiumipitoista mineraalia, petaliittia, löytyi ensimmäisen kerran 1800-luvun alussa ruotsalaiselta Utön saarelta. Itse alkuaineen löysi ruotsalainen kemisti J. A. Arfwedson vuonna 1817 tutkiessaan petaliittimineraalia. Metallisen litiumin (Li) tuottaminen

4. Kriittiset metallit

onnistui vuotta myöhemmin elektrolysoimalla litiumoksidia. Nimi litium viittaa kreikkankielen sanaan lithos, joka tarkoittaa kiveä. Litiumin hyödyntäminen alkoi toisen maailmansodan aikana, kun ilmavoimissa tarvittiin korkeisiin lämpötiloihin soveltuvaa voiteluainetta. Kylmän sodan aikana litiumin käyttö lisääntyi merkittävästi. Litiumista on mahdollista tuottaa ydinaseissa tarvittavaa tritiumia pommittamalla litium-6-isotooppia neutroneilla [Coplen et al., 1987]. Taulukko 18 kokoaa yhteen litiumin keskeiset tiedot [Emsley, 2011].

Taulukko 18. Litium.

nimi	litium
lat. nimi	lithium
lyhenne	Li
järjestysluku	3
luokka	metalli
löytämisvuosi	1817
väri	hopeisen vaaleanharmaa
pitoisuus maankuoressa	15 ppm ¹

¹) [Rudnick & Gao 2003]

85 % maailman tunnetuista litiumvarannoista keskittyy kahteen maahan, Kiinaan ja Chileen. Näiden lisäksi myös Australia on merkittävä litiumin tuottaja. Taulukko 19 sisältää tietoja litiumin varannoista.

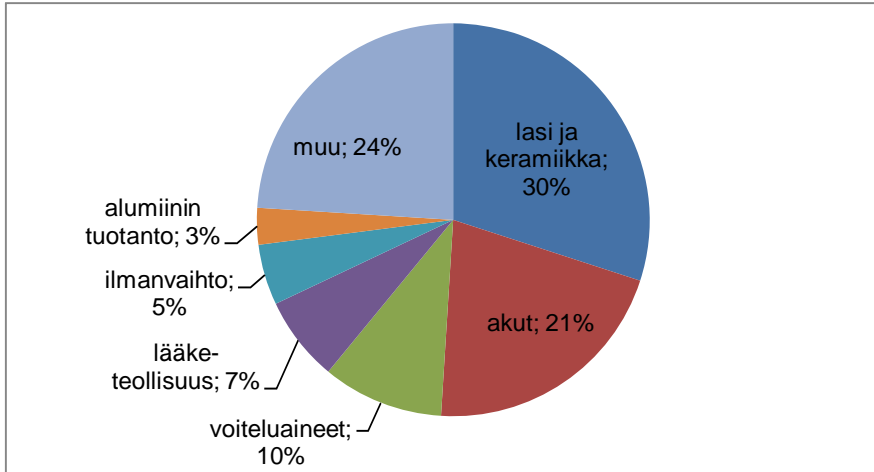
Taulukko 19. Litiumin geologiset esiintymät [USGS 2012c], [USGS, 2011a].

mineraalivarannot	N/A
malmivara	13 000 000 t
vuotuinen tuotanto (2011)	34000 t

Metallinen litium on voimakkaasti reaktiivinen. Metallurgiassa, erityisesti alumiinin tuotannossa, litiumia käytetään poistamaan kuonasta rikkiä ja hiiltä. Litiumia käytetään metalliseoksissa magnesiumin ja alumiinin kanssa. Litium parantaa seoksen kestävyyttä ja elastisuutta. Ilmailu- ja avaruusteknologiassa hyödynnetään kevyitä litiummetalliseoksia [Antila et al., 2008].

Litiumyhdisteistä merkittävimmät ovat litiumkarbonaatit, litiumoksidit sekä litiumstearaatti. Litiumkarbonaattia käytetään lääketieteessä kaksisuuntaisen mielialahäiriön terapiassa sekä emalien valmistuksessa. Lasikeramiikassa puolestaan käytetään litiumoksidia. Litiumstearaattipohjaiset voiteluaineet kestävät korkeita lämpötiloja ja ovat käytössä erityisesti teollisuudessa. Litiumkloridi on voimakkaasti hygroskooppinen, jota ominaisuutta hyödynnetään kaasujen kuivatuksessa [Rayner-Canham & Overton, 2006]. Orgaanisia litiumyhdisteitä käytetään katalyyttisesti polymeerien tuotannossa [Stone & West, 1980]. Litiumhydritit toimivat raketien polttoaineena [Emsley, 2011]. Lisäksi litiumia käytetään optiikassa [Hobbs, 2009].

Vihreässä energiategnologiassa litiumi esiintyy akkuteknologiassa litium-ioniakuissa [Rayner-Canham & Overton, 2006]. Kuva 14 kokoaa yhteen litiumin markkina-segmentit.



Kuva 14. Litiumin käyttökohteet [USGS, 2011a].

4.8 Koboltti

Koboltti (Co) on ollut käytössä pronssiajalta lähtien lasin ja keramiikan sinisenä väriaineena. Arkeologiset löydöt sijoittuvat Egyptiin, Persian alueelle, Pompeijiin ja Kiinaan. Sana koboltti viittaa saksankielen sanaan "Kobold", joka tarkoittaa vuorenpeikkoa, menninkäistä. Saksalaiset kaivosmiehet nimesivät aineen myrkyllisten kobolttipitoisten mineraalien takia. Vuonna 1742 ruotsalainen G. Brandt eristi ensimmäisen kerran kobolttia. Koboltti on maankuoren 32. yleisin alkuaine [Emsley, 2011]. Taulukko 20 kokoaa yhteen keskeiset ominaisuudet.

Taulukko 20. Koboltti.

nimi	Koboltti
lat. nimi	Cobaltum
lyhenne	Co
järjestysluku	27
luokka	Siirtymämetalli
löytämivuosi	pronssiaika, 1742
väri	metallinen, harmaa
pitoisuus maankuorella	26,6 ppm ¹

¹) [Rudnick & Gao 2003]

4. Kriittiset metallit

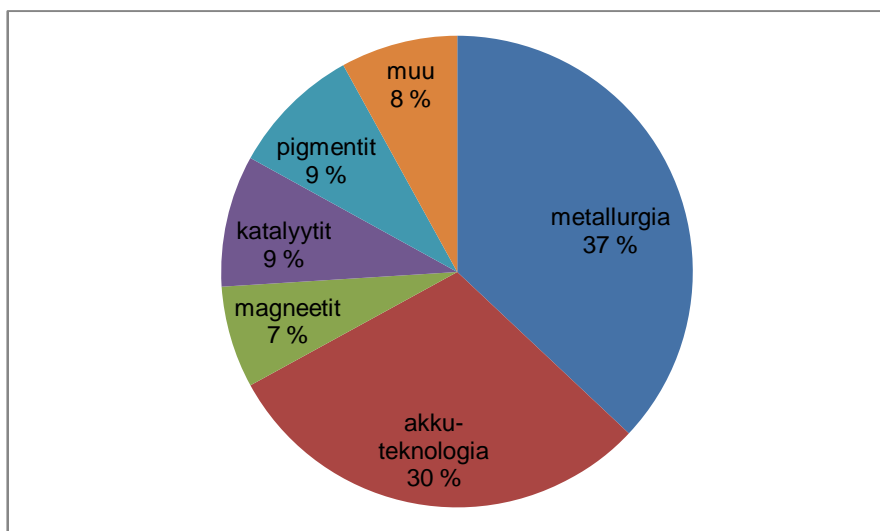
Kobolttia tuotetaan kuparin, nikkelin ja muiden metallien sivutuotteena sekä päätuotteena Marokossa ja Kongossa. Lisäksi kobolttia rikastetaan Kongossa ja Sambiassa entisten kobolttikaivosten kaivosjätteistä. Koboltin tuotanto on voimakkaasti keskittynyttä, yli puolet vuonna 2012 tuotetusta koboltista oli peräisin Kongosta. Tunnetuista varannoista hieman vajaa puolet keskittyy Kongoon, tämän lisäksi myös Australialla on merkittäviä varantoja. [USGS, 2013h], [USGS, 2011b.] Taulukko 21 sisältää koboltin varantotietoja.

Taulukko 21. Koboltin geologiset esiintymät [USGS, 2013h], [USGS, 2011b].

mineraalivarannot	15 000 000 t
malmivara	7 500 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	110 000 t

Koboltin nykyistä markkinarakennetta on arvioitu Cobalt Development Instituten (CDI) toimesta. Merkittävimpiin käyttökohteisiin kuuluvat erilaiset metalliseokset 37 %:n markkinaosuudella. Koboltti on hyvin kova metalli ja siten kobolttiin pohjaavat metalliseokset ovat resistenttejä kulumiselle ja korroosiolle, minkä lisäksi ne ovat stabiileja lämpötilan vaihteluista huolimatta. Siten niitä käytetään mm. kaasuturbiineissa, lentokoneiden turbiineissa, lääketieteen sovelluksissa (implantit) sekä erityistä lujuutta vaativissa työkaluissa. Samoin hiilidioksidin talteenotossa happipolttomenetelmä hyödyntää kobolttipohjaisia metalliseoksia. Tietyt koboltin seokset ovat magneettisia ja siten 7 % koboltista käytetään kestopolttomateriaalien valmistuksessa⁶. Koboltin ja platinan seosta käytetään korujen valmistuksessa. Akkuteknologia on toinen merkittävä koboltin markkina-alue 30 %:n osuudella. Kobolttia tarvitaan litium-ioniakuissa, NiCd- ja NiMH-akuissa. Kemianteollisuudessa kobolttia käytetään hapetusreaktion yhteydessä katalyyttinä. Myös Fischer-Tropsch-prosessissa koboltti toimii katalyyttinä. Koboltin ensimmäinen käyttökohde pigmenttinä lasin, keramiikan ja muiden materiaalien värjäyksessä muodostaa yhä edelleen pienen markkinaosuuden. Kobolttikanuunana tunnettu keinotekoinen ⁶⁰Co isotooppi on voimakas gammasäteilyn lähde. Sitä käytetään syövän hoidossa, lääketieteen instrumenttien steriloinnissa sekä elintarvikkeiden steriloinnissa. Kuva 15 esittää koboltin maailmanmarkkinoiden jakaantumista eri segmenteille vuonna 2011.

⁶ Alnico, joka koostuu kobaltista, raudasta ja nikkelistä, sekä CoSm, koboltti-samariumseos.



Kuva 15. Koboltin markkinaosuudet vuonna 2011 [Cobalt Development Institute, 2012].

4.9 Platinaryhmän metallit

Platinaryhmä koostuu kaikkiaan kuudesta alkuaineesta: rutenium, rodium, palladium, osmium, iridium ja platina. Näistä platina, rutenium ja palladium ovat tarkastelemiemme teknologioiden kannalta merkittäviä, siksi ne esitetään alla lähemmin, Taulukko 22 [Emsley, 2011].

Taulukko 22. Platinaryhmän metallit.

nimi	platina	palladium	rutenium, ruteeni
lat. nimi	platinum	palladium	ruthenium
lyhenne	Pt	Pd	Ru
järjestysluku	78	46	44
luokka	siirtymämetalli	siirtymämetalli	siirtymämetalli
löytämisvuosi	1748	1803	1844
väri	hopeanharmaa	hopean valkoinen	hopeisen vaalea
pitoisuus maankuoressa	0,0015 ppm ¹	0,0015 ppm ¹	0,00057 ppm ¹

¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Platinaa ovat käyttäneet ensimmäisenä Etelä-Amerikan intiaanit korujen valmistuksessa. Eurooppalaiset tutustuivat platinaan löytöretkien myötä, ja ensimmäinen

4. Kriittiset metallit

eurooppalainen viittaus platinaan on vuodelta 1557. Nimi platina tulee espanjan kielestä ja tarkoittaa ”pieni hopea” [Weeks,1968].

Palladiumin mainitsi ensimmäisen kerran englantilainen kemisti W. H. Wollaston vuonna 1802. Vuotta myöhemmin hänen onnistui tuottaa puhdasta palladiummetallia. Nimen palladium Wollaston antoi uudelle metallille asteroidi Pallaksen mukaan [Wollaston, 1804].

Rutenium, josta käytetään myös nimitystä ruteeni, löysi balttiansaksalainen luonnontieteilijä K. E. Claus Siperiasta peräisin olevasta platinam mineraalista. Nimi rutenium tulee latinankielen sanasta Ruthenia, joka viittaa maantieteelliseen alueeseen käsittäen nykyisen Venäjän läntiset osat, Ukrainan ja Valko-Venäjän [Emsley, 2011].

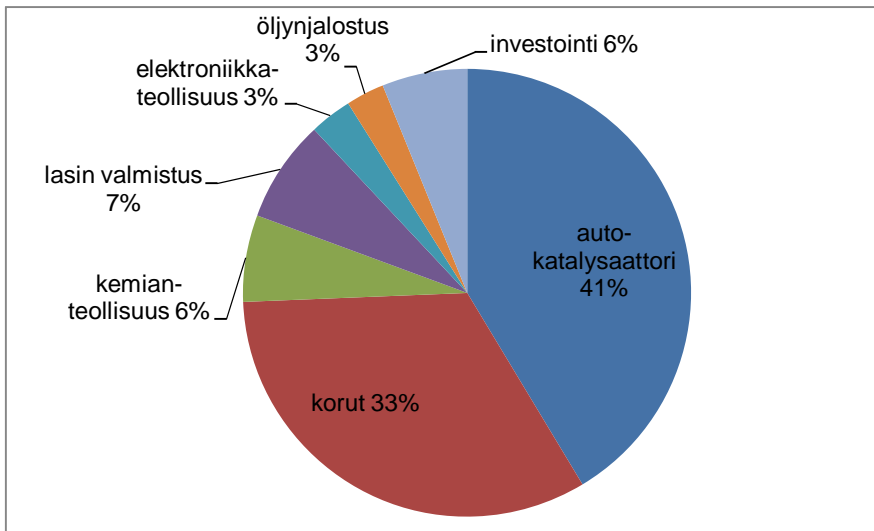
Platinaryhmän metallit ovat kemiallisilta ominaisuuksiltaan hyvin lähellä toisiaan. Ne soveltuvat erittäin hyvin katalyyteiksi. Niiden sähköiset ominaisuudet, stabiilius ja korkeiden lämpötilojen kestävyys johtavat laajoihin teollisiin käyttömahdollisuuksiin [Hunt, 1969].

Platinaryhmän metallit esiintyvät usein yhdessä samoissa mineraaleissa [Harris, 1991]. Siten USGS ilmoittaa varantoihin liittyvät tiedot koko platinaryhmän metalleille. Suurin tunnettu esiintymä Bushveld Complex sijaitsee Etelä-Afrikassa. Maalla onkin kaikkiaan yli 90 % platinaryhmän tunnetuista malmivaroista. Myös Venäjällä ja USA:ssa on merkittäviä malmivaroja. Etelä-Afrikka ja Venäjä olivat vuonna 2012 merkittävimmät platinan ja palladiumin tuottajat. Taulukko 23 kokoaa yhteen kaikkien platinaryhmän metallien varantotiedot sekä platinan ja palladiumin tuotantotiedot vuodelta 2012.

Taulukko 23. Platinaryhmän metallien geologiset esiintymät [USGS, 2013i], [USGS, 2009a].

mineraalivarannot	80 000 000 t (kaikki PGM)
malmivara	66 000 000 t (kaikki PGM)
vuotuinen tuotanto (vuonna 2012)	platina: 179 000 t palladium: 200 000 t

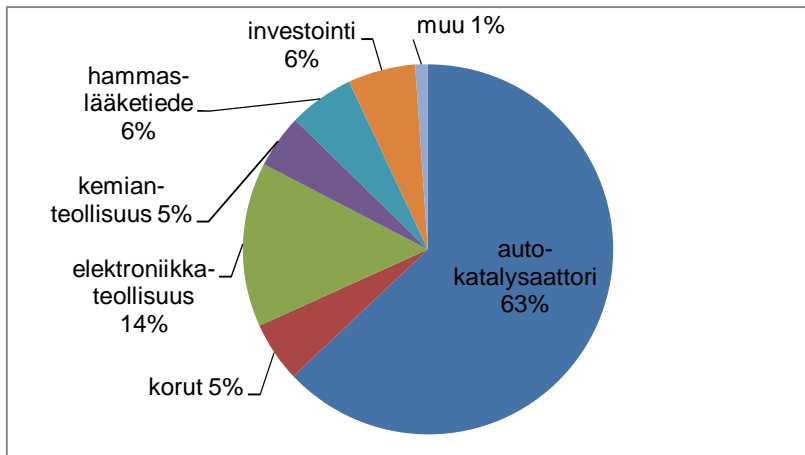
Platinaa käytetään vähähiilisessä energiateknologiassa erityisesti katalyytin ominaisuudessa polttokennoissa. Polttokennojen kaupallinen valmistus on vielä hyvin pientä, joten markkinatiedoissa sitä ei ole eritelty. Suurin markkina platinalle on autojen katalysointiosastoissa (41 %) ja korujen valmistuksessa (33 %). Muita kilpailevia käyttökohteita on kemianteollisuudessa (käyttö katalyyttinä mm. silikonin, muovien sekä lannoitteiden valmistuksessa), nestekidenäyttöjen valmistuksessa, elektroniikkateollisuudessa erityisesti kovalevyjen valmistuksessa sekä öljynjalostuksessa katalyyttinä. Lisäksi platina on myös investointikohde. Kuva 16 kokoaa yhteen platinan markkinaosuudet vuonna 2011.



Kuva 16. Platinan markkinaosuudet vuonna 2011. [Johnson Matthey, 2012].

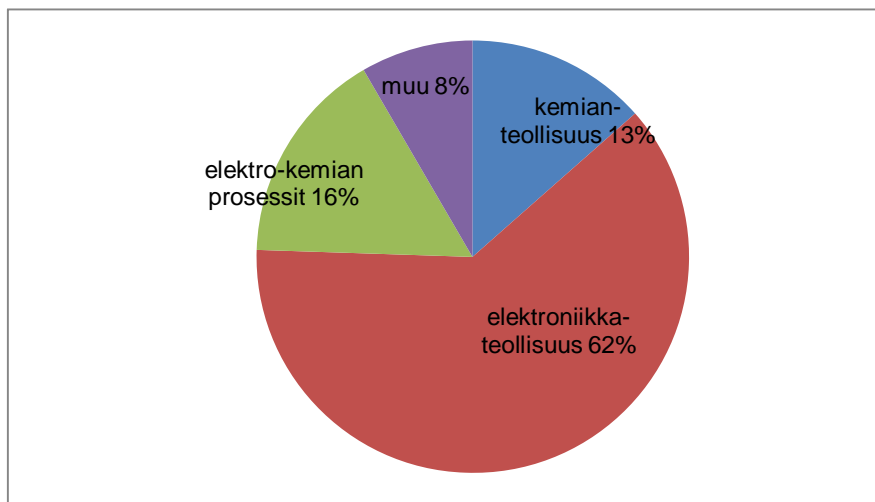
Palladiumin käyttö vähähiilisessä teknologiassa on toistaiseksi vähäistä, mutta se tulee kasvamaan, mikäli sähköautojen määrä lisääntyy merkittävästi tulevaisuudessa. Palladiumia tarvitaan autojen tehoelektroniikkaan. Palladiumin merkittävin markkinasegmentti on autojen katalysaattorit (63 %). Toinen merkittävä käyttösegmentti on elektroniikkateollisuus (14 %). Palladiumia käytetään keraamisten kondensaattoreiden valmistuksessa. Joissakin koruissa käytettävissä metalliyhdisteissä on palladiumia, samoin hammaslääketieteessä mm. kruunuissa. Lisäksi palladiumilla on kysyntää investointikohteena. Kuva 17 esittää palladiumin markkina-tilanteen vuonna 2011.

4. Kriittiset metallit



Kuva 17. Palladiumin markkinaosuudet vuonna 2011. [Johnson Matthey, 2012].

Ruteniumia tarvitaan vähähiilisessä energiateknologiassa Grätzel-kennojen valmistuksessa sekä biopolttonesteitä tuottavassa Fischer-Tropsch-prosessissa katalyyttinä. Merkittävin osa ruteniumin markkinoista on elektronikkateollisuudessa, erityisesti kovalevyjen valmistuksessa. Kemiateollisuudessa ruteniumia käytetään katalysaattorina. Rutenium toimii myös katalysaattorina joissakin elektrokemiallisissa prosesseissa, kuten kloorin tai natriumhydroksidin valmistuksessa. Kuva 18 esittää ruteniumin markkinatilanteen vuonna 2011.



Kuva 18. Ruteniumin markkinaosuudet vuonna 2011. [Johnson Matthey, 2012].

4.10 Fluori F

Fluori on kellanvihreä, myrkyllinen ja yksi kaikkein reaktiivisimmista alkuaineista. Luonnossa se esiintyy eri mineraaleissa, erityisesti fluorisälvässä (CaF_2), joka on kaupallisesti tärkein fluoripitoinen mineraali. Fuorspar-niminen aine mainittiin ensimmäisen kerran jo vuonna 1530. D. Mendelejev sisällytti fluorin alkuaineiden jaksolliseen järjestelmään vuonna 1886, mutta vasta kaksi vuosikymmentä myöhemmin ranskalainen kemisti H. Moissan onnistui keksimään menetelmän, jolla eristää fluoria. Myöhemmin hän sai löydöstään kemian Nobel-palkinnon. Suuressa määrin fluoria alettiin käyttää toisen maailmansodan aikana Manhattan- projektissa, jossa sitä tarvittiin uraanin isotoopin U-235 eristämiseksi. Fluori on maankuoren 13. yleisin alkuaine. Taulukko 24 kokoaa yhteen fluorin keskeisiä ominaisuuksia [Emsley, 2011].

Taulukko 24. Fluori.

nimi	fluori
lat. nimi	fluor
lyhenne	F
järjestysluku	9
luokka	epämetalli, halogeeni
löytämisvuosi	1886
väri	kellanvihreä
pitoisuus maankuoressa	557 ppm ¹

¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Maailman suurimmat fluorisälvän varannot löytyvät Etelä-Afrikasta, mutta myös täällä hetkellä tärkeimmillä tuottajamailla, Kiinalla ja Meksikolla, on merkittäviä varantoja. Taulukko 25 esittää fluorin varantotietoja.

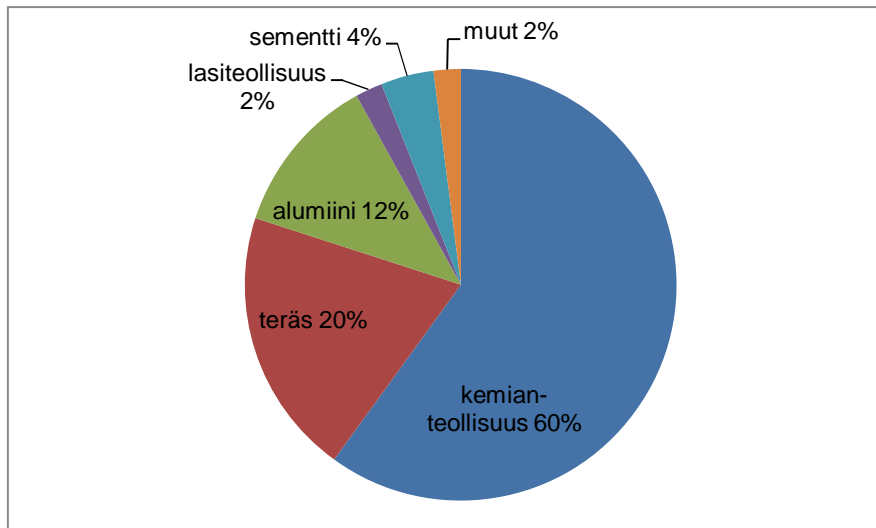
Taulukko 25. Fluorin geologiset esiintymät [USGS, 2013j], [USGS, 2009b].

mineraalivarannot	470 000 t
malmivara	240 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	6850 t

Vetyfluoridi (HF) on merkittävin fluorisälvän jatkojaloste. Sitä käytetään elektroniikkateollisuudessa, freonien valmistuksessa (CFC-yhdisteet: palonestoaineina, puhdistusaineina, ponnekaasuna, lämmönsiirrossa), uraanin prosessoinnissa ja lääketeollisuudessa. Teräksen ja alumiinin tuotannossa fluorisälpä laskee mineraalin sulamispisteen ja poistaa metallista epäpuhtauksia. Lisäksi fluorisälpää kuluu lasi- ja keramiikkateollisuudessa [BGS, Fluorspar, 2011]. Vihreässä energia-

4. Kriittiset metallit

teknologiassa fluoria käytetään polttokennojen valmistuksessa. Kuva 19 esittää fluorisälvän markkinatilanteen vuonna 2010.



Kuva 19. Fluorisälvän markkinat vuonna 2010 [European Commission, 2010].

4.11 Molybdeeni

Molybdeeni (Mo) on ollut pitkään tunnettu: jo 1300-luvulla käytettiin Japanissa molybdeeniä miekkojen kovettamiseen, mutta alun perin molybdeenin esiintymät sekoitettiin lyijyn tai myös grafiitin esiintymiin. Vuonna 1778 ruotsalainen kemisti C. Scheele onnistui tuottamaan molybdeenioksidia ja todisti siten, että kyseessä on uusi alkuaine. Vuonna 1782 erotettiin ensimmäistä kertaa puhdasta molybdeeniä.

Molybdeenin teollinen käyttö lähti liikkeelle vasta 1900-luvun alussa metallurgian teknologisen kehityksen myötä [Reich, 2002]. Maailmansotien aikana molybdeenin kysyntä kasvoi voimakkaasti. Molybdeenillä vahvistettua terästä käytettiin panssariajoneuvojen valmistuksessa [Emsey, 2011]. Molybdeenin pitoisuus maankuoressa on melko alhainen ja se on vasta 54. yleisin alkuaine. Taulukko 26 esittää molybdeenin keskeiset ominaisuudet.

Taulukko 26. Molybdeeni.

nimi	molybdeeni
lat. nimi	molybdenium
lyhenne	Mo
järjestysluku	42
luokka	siirtymämetalli
löytämivuosi	1782
väri	hopean valkoinen
pitoisuus maankuoressa	0,8 ppm ¹

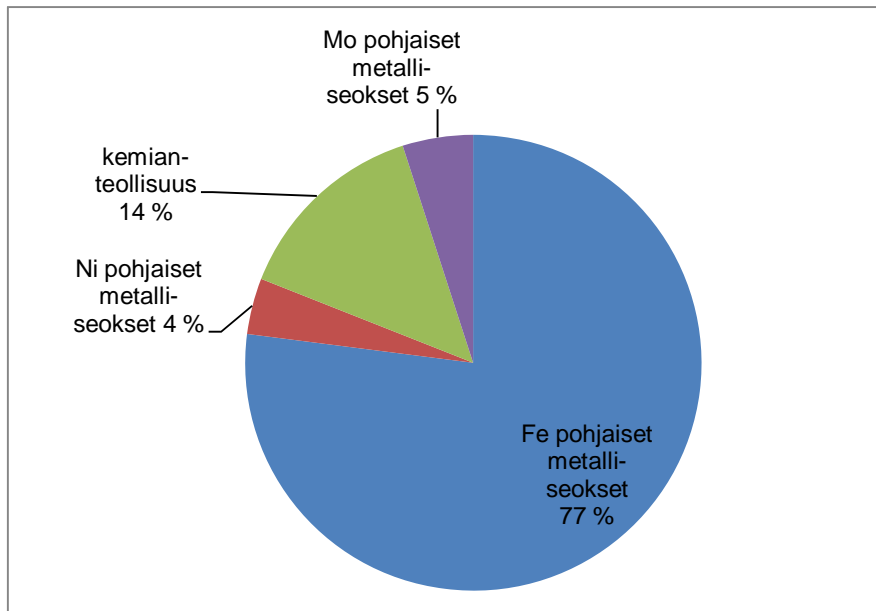
¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Hieman yli puolet molybdeenin tuotannosta vuonna 2011 oli peräisin molybdeenikaivoksista, alle puolet sivutuotteena kuparikaivoksissa. Merkittävin tuottajamaa on Kiina, muita suuria tuottajia ovat USA, Chile, Meksiko ja Peru. Taulukko 27 sisältää molybdeenin varantotietoja.

Taulukko 27. Molybdeenin geologiset esiintymät [USGS, 2013k], [USGS, 2009c].

mineraalivarannot	19 000 000 t
malminvara	11 000 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	250 000 t

Molybdeenin merkittävimmät käyttökohteet ovat raudan ja teräksen seokset. Molybdeenilla on hyvin korkea sulamispiste (2617 °C), ja siten se tuo seokseen kovuutta sekä parantaa metallin lämmönkestävyyttä ja vaikuttaa seoksen valuominaisuuksiin. Käyttötarkoituksesta riippuen molybdeenin osuus seoksessa vaihtelee yleisesti välillä 0,2–0,5 %. Molybdeenillä vahvistettua terästä käytetään mm. auto-teollisuudessa, laivanrakennuksessa ja lentokoneiden valmistuksessa. Energia-sektorilla molybdeenin positiivista vaikutusta lämmönkestävyyteen hyödynnetään höyryturbiineissa, generaattoreissa ja mm. CCS-tekniologiassa. Molybdeenin ja nikkelin korroosioresistenteissa seoksissa molybdeenin osuus vaihtelee välillä 5–29 %. Tyypillisiä käyttökohteita löytyy petrokemian teollisuudessa, kemianteollisuudessa ja päästöjen kontrolloinnissa. Korkeita lämpötiloja kestävät seokset sisältävät 2–25 % molybdeeniä. Seoksia käytetään mm. kaasuturbiineissa tai lasiteollisuudessa [IMO]. Myös CIGS-aurinkopaneeleissa on käytössä molybdeenipohjainen seos anodipuolen sähköisen kontaktin luomiseksi [Compound Semiconductor, 2010]. Kemianteollisuudessa molybdeenin yhdisteitä käytetään katalyyttinä, voiteluaineena, lannoitteena maataloudessa, pigmentteinä sekä korroosion estossa [IMO]. Kuva 20 esittää molybdeenin markkinatilannetta vuonna 2010.



Kuva 20. Molybdeenin markkinat vuonna 2010 [IMOA].

4.12 Niobium ja tantaali

Englantilainen kemisti C. Hatchett löysi niobiumin (Nb), joka alun perin nimettiin kolumbiumiksi vuonna 1801. Ruotsalainen mineralogi A. Ekeberg löysi tantaalin (Ta) vuonna 1802 Suomesta Kemiöstä saamastaan näytteestä, joskin kahden vuosikymmenen ajan tantaalia ja niobiumia pidettiin yhtenä alkuaineena. Vuonna 1820 ensimmäisen kerran onnistui epäpuhtaan tantaalin eristäminen ja vuonna 1903 puhtaan tantaalin. Alkuaineiden nimet juontavat juurensa Kreikan mytologiassa esiintyvään Tantalokseen ja tämän tyttäreeseen Niobeen.

Ensimmäisiin tantaalin käyttökohteisiin lukeutuivat hehkulamppujen hehkulan-
gat, jotka myöhemmin on korvattu wolframilla. Vastaavasti niobiumin havaittiin vahvistavan terästä, ja siten sen merkittävimäksi käyttökohteeksi 1920-luvulta lähtien muodostui teräksen tuotanto. Lisäksi niobium-titaaniseokset ovat suprajoh-
tavia, ja niitä käytetään sähkömagneettisissa sovelluksissa. Taulukko 28 kokoaa yhteen tantaalin ja niobiumin keskeisiä ominaisuuksia [Emsley, 2011].

Taulukko 28. Niobium ja tantaali.

nimi	niobium	tantaali
lat. nimi	niobium	tantalum
lyhenne	Nb	Ta
järjestysluku	41	73
luokka	siirtymämetalli	siirtymämetalli
löytämivuosi	1801	1802
väri	harmaa, metallinen	siniharmaa
pitoisuus maankuoressa	8 ppm ¹	0,7 ppm ¹

¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Niobium ja tantaali eivät esiinny luonnossa puhtaana metallina vaan mineraaleissa eri oksidien muodoissa. Niobiumin merkittävin tuottajamaa on Brasilia, tantaalin Brasilia ja Australia. Taulukko 29 sisältää tietoa niobiumin ja tantaalin varannoista.

Taulukko 29. Niobiumin ja tantaalin geologiset esiintymät [USGS 2013l, m], [USGS, 2008b, c].

	niobium	tantaali
mineraalivarannot	N/A	180 000 t
malmivara	> 4 000 000 t	120 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	69 000 t	765 t

Vihreässä energiateknologiassa niobiumia ja tantaalia käytetään CCS-tekniikan yhteydessä. Niobiumin merkittävin käyttökohde on korkealaatuisen teräksen tuotannossa, 89 % vuonna 2010 käytetystä niobiumista on ohjautunut teräksen tuotantoon. Loput 11 % koostuvat muista metalliseoksista sekä niobiumin kemiallisista yhdisteistä. Tantaalin yksi merkittävimmistä käyttökohdeista on elektroniikkakomponenttien valmistuksessa, erityisesti kondensaattoreiden. 24 % tantaalista ohjautui kondensaattoreiden valmistukseen vuonna 2010. Tantaalin metalliseoksilla on korkea sulamispiste ja niillä on hyvät lujuusominaisuudet. 41 % tantaalimarkkinoista ohjautui erilaisiin metalliseoksiin, joita tarvitaan mm. vaativissa rakennuskohteissa (esim. öljynporauslautat), työkaluissa, lääketieteen sovelluksissa, lentokoneteknologiassa ja uuneissa. Lisäksi tantaalin käyttökohdeita löytyy kemianteollisuudesta. [BGS, 2011a].

4.13 Vanadiini

Vanadiinin (V) löysi alun perin meksikolainen geologi A. del Río vuonna 1801. Vanadiini muodostaa kauniita värillisiä kemiallisia yhdisteitä, johon myös alkuaineen

4. Kriittiset metallit

nimi viittaa (skandinaavisen kauneuden ja fertiliteetin jumalan Vanirin). Alun perin vanadiinin suoloja käytettiin nahan parkitsemiseen sekä väripigmentteinä. Vuonna 1896 keksittiin vanadiinin terästä lujittava vaikutus [Emsley, 2011]. Taulukko 30 kokoaa yhteen vanadiinin ominaisuuksia.

Taulukko 30. Vanadiini.

nimi	vanadiini
lat. nimi	vanadium
lyhenne	V
järjestysluku	23
luokka	siirtymämetalli
löytämivuosi	1801
väri	harmahtava
pitoisuus maankuoressa	138 ppm ¹

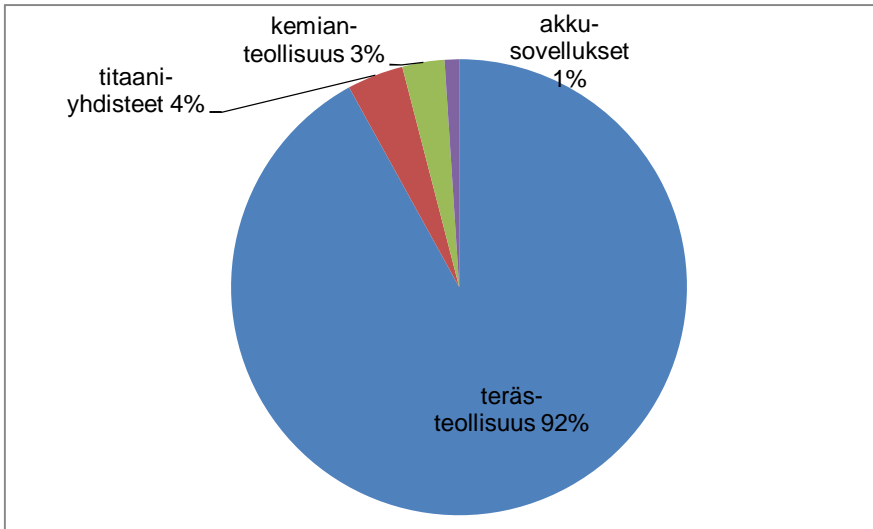
¹⁾ [Rudnick & Gao 2003]

Vanadiini on maankuoren 19. yleisin alkuaine ja se esiintyy luonnossa kaikkiaan yli 60 eri mineraalissa. Vanadiinipitoista mineraalia tuotetaan rautamalmin louhinnan yhteydessä. Noin kaksi kolmasosaa vanadiinin tuotannosta syntyy terästuo-
tannon sivutuotteena. Lisäksi vanadiinia saattaa esiintyä hiili- ja öljyesiintymien yhteydessä. Merkittävimmät tuottajamaat ovat Kiina, Venäjä sekä Etelä-Afrikka. Taulukko 31 sisältää tietoa vanadiinin varannoista.

Taulukko 31. Vanadiinin geologiset esiintymät [USGS 2013a], [USGS, 2009d].

reserve base	38 000 000 t
reserve	14 000 000 t
vuotuinen tuotanto (2012)	63 000 t

Toistaiseksi vanadiinin käyttö vihreässä energiateknologiassa on ollut hyvin vähäistä, mutta tilanne saattaa muuttua tulevaisuudessa. Vanadiinia käytetään CCS-
teknologiassa metalliseoksissa. Merkittävä uusi markkina saattaa syntyä vanadiini-
redoksivirtausakkujen kautta aurinko- ja tuulisovellusten yhteyteen. Myös litium-
pohjaisten akkujen tuotannossa kuluu pieniä määriä vanadiinia. Kaiken kaikkiaan
akkusovellukset muodostivat 1 % vanadiinin markkinoista vuonna 2012. Toistai-
seksi vanadiinin merkittävin käyttökohde 92 %:n markkinaosuudella on teräksen
tuotanto sen terästä lujittavan ominaisuuden vuoksi. Muita markkinasegmenttejä
ovat titaaniyhdisteet (4 %) ja kemianteollisuus (3 %), jossa vanadiinia käytetään
erityisesti katalyyttinä, mutta myös erityislasiin tuotannossa, keraamisena pig-
menttinä sekä petrokemian sovelluksissa [Perles, 2012]. Kuva 21 esittää vanadiinin
markkinaosuuksia vuonna 2012.



Kuva 21. Vanadiinin markkinaosuudet vuonna 2012 [Perles, 2012].

4.14 Kooste kriittisten metallien varantotiedoista

Taulukossa 32 on vielä koottu yhteen edellisten kappaleiden keskeiset tiedot.

4. Kriittiset metallit

Taulukko 32. Kriittisten metallien mineraalivaraannot, vuotuinen tuotanto sekä pitoisuus maankuoressa.

Metalli	Lyhenne	Pitoisuus maan kuoressa	Mineraalivaraanto	Malmivara	Vuotuinen tuotanto
		ppm	tonnia	tonnia	tonnia
telluuri	Te	0,005	N/A	24 000	N/A
indium	In	0,052	16 000	11 000	670
gallium	Ga	16	N/A	N/A	273
germanium	Ge	1,3	N/A	450 000	128000
hopea	Ag	0,055	N/A	540 000	24 000
REE		vaihtelee		110 000 000	110 000
litium	Li	15	N/A	13 000 000	34 000
koboltti	Co	26,6	15 000 000	7 500 000	110 000
platina-ryhmä	Pt, Pd, Ru	vaihtelee	80 000 000	66 000 000	179 000 (Pt) 200 000 (Pd)
fluori	F	557	470 000	240 000	6850
molybdeeni	Mo	0,8	19 000 000	11 000 000	250 000
niobium	Nb	8	N/A	4 000 000	69 000
tantaali	Ta	0,7	180 000	120 000	765
vanadiini	V	138	38 000 000	14 000 000	63 000

5. Johtopäätökset

”Low Carbon Finland 2050 -platform” -hankkeessa on valittu lähtökohdaksi hiilidioksidipäästöjen vähentäminen vähintään 80 %:lla vuoteen 2050 mennessä, kun lähtötasoksi on valittu vuosi 1990. Hankkeessa käydään läpi erilaisia potentiaalisia vähähiilisiä polkuja, joilla Suomen olisi mahdollista tavoite saavuttaa. Yksi hankkeen keskeisiä teemoja ovat vihreissä energiateknologioissa esiintyvät kriittiset metallit. Mikäli vihreiden energiateknologioiden markkinat kasvavat merkittävästi jatkossa, sillä tulee olemaan vaikutuksia metallien kysyntään maailmanmarkkinoilla eivätkä saatavuusongelmat ole pois suljettuja.

Julkaisussa on käyty läpi hiilidioksidivapaita energiantuotantoteknologioita (aurinkosähkö, tuulivoima, biopolttonesteet, ydinvoima ja hiilidioksidin talteenotto) sekä energiaa säästäviä vihreitä teknologioita (valaistus, sähköautot). Lisäksi sähkön merkitys tulee jatkossa kasvamaan energiasektorilla polttoaineiden kustannuksella. Tämä tarkoittaa investointeja sähköverkkoon, verkon ohjaukseen sekä eri sähkön varastointiteknologioihin (akut, polttokennot, elektrolyysi).

Kyseisissä teknologioissa esiintyy 23 erityismetallia, joista kahdeksan kuuluu harvinaisten maametallien ryhmään ja kolme platinametallien ryhmään. Puolijohdemetalleja (telluuri Te, indium In, gallium Ga ja germanium Ge) tarvitaan merkittävässä määrin aurinkopaneeleissa. Toinen keskeinen käyttökohde on elektroniikkateollisuudessa. Jos energiasektorin asteittainen siirtyminen kohti suurempaa sähkön osuutta toteutuu, tulee myös elektroniikan merkitys korostumaan energiasektorilla mm. älykkään sähköverkon ohjauksjärjestelmissä ja sähköautoissa. Lisäksi niin aurinkosähkössä kuin elektroniikassakin on käytössä hopea sen suuren sähkönjohtavuuden ansiosta.

Harvinaisista maametalleista kahdeksaa tarvitaan vihreissä energiateknologioissa. Kestomagneetit, jotka mahdollistavat kompaktin rakenteen moottorille tai generaattorille, ovat käytössä niin sähköautoissa kuin tuulivoimaloissakin. Yleisin kestopomagneetti pohjaa neodyymiin (Nd), mutta sen ohella siinä esiintyy myös pienempiä määriä dysprosiumia (Dy), terbiumia (Tb) sekä praseodyymiä (Pr). Energiatehokkaassa valaistuksessa, loistelampuissa sekä LED-valoissa hyödynnetään harvinaisia maametalleja loisteaineena (europium Eu, cerium Ce, lantaani La, yttrium Y ja terbium Tb). Korkean lämpötilan suprajohdat HTS-kaapelit saattavat jatkossa korvata osan kestopomagneettien tarpeesta tuulivoimassa. Lisäksi kaupunkialueilla sähköverkkojen osalta HTS-kaapelit saattavat tulla kyseeseen.

Kaapelin rakenteessa esiintyy lantaania (La), ceriumia (Ce) ja yttriumia (Y). Samoja metalleja tarvitaan myös kiinteäoksidipolttokenon rakenteessa sekä NiMH-akun metallihydridissä.

Katalyytteinä kemiallisissa reaktiossa toimivat usein platinaryhmään kuuluvat metallit. Platina (Pt) on tyypillisesti käytössä polttokennoissa, erityisesti sähköautoihin soveltuvassa protonivaihtokalvopolttokennossa (PEMFC) sekä fosforihappopolttokennoissa (PAFC). Myös polttokennon käänteisessä reaktiossa eli elektrolyysissä platina toimii katalyyttinä. Akkuteknologioissa tyypillinen katalyytti on koboltti. Kobolttia käytetään myös alkaalielektrolyysissä sekä kiinteäoksidipolttokennoissa (SOFC). Biopolttoaineita valmistetaan Fischer-Tropsch-menetelmällä, jossa katalyyttinä toimiva kallis rutenium on korvattavissa kobollilla. Myös uutta aurinkosähköteknologiaa edustavissa väriaineaurinkokennoissa on käytössä ruteniumia.

Metalliseoksiin lisätään erityismetalleja tuomaan seokselle haluttuja fysikaalisia ominaisuuksia, erityisesti lujuuteen ja kestävyysliittymien. Tällaisia seosmetalleja ovat hafnium (Hf), molybdeeni (Mo), niobium (Nb), tantaali (Ta), vanadiini (V), koboltti (Co) ja reenum (Re). Erityismetalleja on käytössä mm. ydinvoimaloissa sekä hiilidioksidin talteenottolaitoksissa. Liitteessä 1 olevaan taulukkoon on koottu matriisinomaisesti raportissa läpikäyty vihreät energiateknologiat sekä niissä esiintyvät erityismetallit.

Metallien kriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä on moninaisia ja siten näkemys kriittisiksi luokiteltavista metalleista vaihtelee. Yksi keskeinen kysymys liittyy metallin saatavuuteen. Tähän vaikuttavat toisaalta tunnetut geologiset varannot sekä varantojen maantieteellinen jakautuneisuus. Poliittinen epästabiilitteetti tuottajamaissa sekä ympäristölainsäädäntöön liittyvät kysymykset saattavat tuoda lisää epävarmuustekijöitä. Esimerkiksi harvinaisten maametallien tuotanto keskittyi länsimaiden tiukentuneen ympäristölainsäädännön vuoksi pitkälti Kiinaan. Kiinan REE-metallien vientirajoitukset oman teollisen tuotannon suojelemiseksi ovat viime vuosina johtaneet kyseisten metallien maailmanmarkkinahintojen merkittävään kasvuun. Tuotannon uudelleenkäynnistäminen länsimaissa, erityisesti USA:ssa, Kanadassa ja Australiassa, on käynnissä, mutta hidasta.

Toinen metallien kriittisyyteen vaikuttava tekijä liittyy metallin merkitykseen vihreissä energiateknologioissa. Teknologioiden riippuvuutta kriittisestä metallista on mahdollista vähentää tuotekehityksen kautta, mm. c-Si-aurinkopaneelien hopean tarve on mahdollista vähentää peräti kymmenekseen nykyisestä korvaamalla hopeaa osittain kuparilla. PEMFC-polttokennoissa katalyyttinä toimivan platinan määrään on mahdollista vaikuttaa nanostruktuureilla. Joissakin tapauksissa myös substituutio kokonaisuudessaan jollain toisella metallilla on mahdollista, kuten keskittävän aurinkovoiman peilipinnoissa käytettävä hopea on korvattavissa alumiinilla. Tämä tosin vaikuttaa heikentävästi laitoksen energiantuotannon hyötysuhteeseen.

Erityismetallien kierrätys on toistaiseksi vielä vähäistä johtuen monista haasteista, jotka liittyvät toisaalta kattavan keräysinfrastruktuurin puutteeseen samoin kuin haasteisiin itse kierrätysprosessissa. Erityismetallien ongelma on niiden pienet pitoisuudet tuotteissa, ja siksi metallin erottelu muun kierrätysmateriaalin

joukosta on haasteellista. Usein arvokkaampi metalli häviääkin pääasiallisen kiertäysmetallin, kuten kuparin, yhteyteen epäpuhtautena.

Tarkemmat kvantitatiiviset arviot kriittisten metallien kysynnälle ”Low Carbon Finland 2050 -platform” -projektin eri skenaarioissa esitetään toisaalla. Ennakoitavissa oleva tuleva kehitys saattaa tarjota Suomen elinkeinoelämälle uusia elinvoimaisia mahdollisuuksia. Suomen mineraalistrategiassa nähdään kaivostoiminta kasvavana alana. Mutta myös teknologian kehitys voi tuoda uusia innovaatioita ja ratkaisuja vihreiden energiateknologioiden materiaalikysymyksiin. Samoin kierrätykseen liittyvän teknologian ja infrastruktuurin kehittämisessä on nähtävissä merkittävä potentiaali.

Kiitokset

Olen selvitystä laatiessani haastatellut useita asiantuntijoita, jotka ovat tarjonneet näkemyksensä projektin käyttöön. Heille haluan tässä yhteydessä lausua kiitokseni hyvästä yhteistyöstä:

Aurinkoenergia:

Hele Savin, Aalto-yliopisto; Petri Konttinen, Auribis Finland Oy;
Tommi Vuorinen, VTT

Tuulivoima:

Petteri Antikainen, VTT; Jenni Pippuri, VTT

Biopolttonesteet:

Matti Reinikainen, VTT

Polttokennot, akut ja energiavarastot:

Pertti Kauranen, VTT; Jari Ihonen, VTT; Olli Himanen, VTT;
Kai Vuorilehto, Aalto-yliopisto / Skeleton Technologies
Tommi Karjalainen; Akkuser Oy; Ulla Lassi, Oulun Yliopisto;
Raili Alanen, VTT

Valaistus:

Leena Tähkämö, Aalto-yliopisto; Hannu Pihala, VTT

Sähköautot:

Juhani Laurikko, VTT; Kari Tammi, VTT;

Kriittiset metallit / kierrätysteknologiat:

Susanna Kihlman, GTK
Ulla-Maija Mroueh, VTT; Margaretha Wahlström, VTT; John Bacher, VTT

Lähdeluettelo

- Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S. & Saari, P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita 2199. VTT, Espoo. ISBN 951-38-6160-0. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>.
- Andersson, B.A. 2000. Materials availability for large-scale thin-film photovoltaics. Progress in Photovoltaics 8: 61–76.
- Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Lüllmann, A., Erdmann, L., Scharp, M., Handke, V. & Marwede, M. 2009. Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/n/de/publikationen/Schlussbericht_lang_20090515_final.pdf.
- Antila, A.-M., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H. & Pohjakallio, M. 2008. Tekniikan kemia. Edita.
- APS/MRS, 2011. Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies. <http://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/loader.cfm?csModule=security/getfile&PageID=236337>
- Arico, A.S., Siracusano, S., Bruggaglio, N., Baglio, V., Blasi, A.D. & Antonucci, V. 2013. Polymer electrolyte membrane water electrolysis: status of technologies and potential applications in combination with renewable power sources. J. Appl. Electrochem 43: 107–118.
- BGS, 2011a. Mineral Profile Niobium-tantalum. www.bgs.ac.uk/mineralsuk/search/home.html.
- BGS, 2011b. Rare Earth Elements, Mineral Profile, British Geological Survey. <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html>.
- BGS, 2011. Mineral Profile Fluorspar. <http://www.bgs.ac.uk/search/home.html?q=fluorspar>.
- BGS, 2012. Risk List 2011. sekä Risk List 2012. <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/riskList.html>.
- Bine Informationsdienst, 2010. Hochtemperatur-Supraleiter. <http://www.bine.info/publikationen/publikation/hochtemperatur-supraleiter/>.

- Brouzgou, A., Song, S.Q. & Tsiakaras, P. 2012. Low and non-platinum electrocatalysts for PEMFCs: Current state, challenges and prospects. Appl. Cat. B: Env. 127: 371–388.
- Buchert, M. 2011. Rare Earths – a Bottleneck for Future Wind Turbine Technologies? Wind Turbine Supply Chain & Logistics, Berlin 29th August 2011. <http://www.oeko.de/oekodoc/1296/2011-421-en.pdf>.
- Buchert, M., Jenseit, W., Dittrich, S., Hacker, F., Schueler-Hainsch, E., Ruhland, K., Knöfel, S., Goldmann, D., Rasenack, K. & Treffer, F. 2011. Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltlastungspotentiale von Elektrofahrzeugen. <http://www.oeko.de/oeko/doc/1334/2011-449-de.pdf>.
- Buchert, M., Schüler, D. & Bleher, D. 2009. Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential. <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1202xPA-Critical%20Metals%20and%20their%20Recycling%20Potential.pdf>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2010. Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/rohstoffstrategie-der-bundesregierung>. Englanniksi: <http://www.bmwi.de/English/Navigation/Service/publications,did=376156.html>.
- Calstart, 2010. Energy Storage Compendium: Batteries for Electric and Hybrid Heavy Duty Vehicles.
- Cobalt Development Institute CDI, 2012. Cobalt Facts, Supply & Demand. <http://www.thecd.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt%20Facts-Supply%20%20Demand-2011.pdf>.
- Compound Semiconductor, 2010. Inside CIGS solar panels. <http://compoundsemiconductor.net/csc/features-details/19732466/Inside-CIGS-Solar-Panel.html>.
- Conte, F.V. 2006. Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review. Elektrotechnik & Informationstechnik (2006) 123(10): 424–431.
- Coplen, T.B., Bohlke, J.K., De Bievre, P., Ding, T., Holden, N.E., Hopple, J.A., Krouse H.R. & Lamberty, A. 2002. Isotope-abundance variations of se-

- lected elements (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry 74(10): 1987.
- Cremer, C. 2007. Zukunftsmarkt CO₂-Abscheidung und Speicherung. Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Umwelt, Innovation, Beschäftigung 04/2007. ISSN 1865-0538. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3447.pdf>.
- CRM Innonet, <http://www.criticalrawmaterials.eu/project-summary/>. Luettu 15.4.2013.
- Defra, 2010. Review of the Future Resource Risks Faced by UK Businesses and an Assessment of Future Viability. <http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu&Module=More&Location=None&Completed=2&ProjectID=17161>.
- Deutsche Energieagentur GmbH, 2010. Dena Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Erneuerbare/Dokumente/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF.
- Dutch Ministry of Foreign Affairs. Policy Document on Raw Materials. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/mss-netherlands_en.pdf.
- Eberle, U., Mueller, B. & von Helmholt, R. 2012. Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012. Energy Environ. Sci. 5: 8780–8798.
- EEA, 2011. Resource Efficiency in Europe – Policies and approaches in 31 EEA member and cooperating countries. <http://www.eea.europa.eu/highlights/publications/resource-efficiency-in-europe/>.
- Emsley, J. 2011. Nature's Building Blocks. An A-Z Guide to the Elements. New edition. Oxford University Press. New York, USA.
- Environmental Protection Administration, 2010. Zero waste and resource recycling promotion. <http://www.epa.gov.tw/en/epashow.aspx?list=112&path=12305&guid=54ed0a74-3dc5-42c5-9250-0fbf51f92dc3&lang=en-us>. Käyty sivulla 11.12.2012.
- EPIA, 2011. Solar Generation 6. Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World. http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=/uploads/tx_epiapublications/Solar_Generation_6_2011_Full_report_Final.pdf&t=1387437100&hash=294e047aa0f36ee0f088c32ac219a4ab000be38e.

- European Commission, 2010. Critical raw materials for the EU – Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf.
- European Commission, 2011. 2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET Plan). Technology Descriptions. JRC Scientific and Technical Reports JRC 67097. ISBN 978-92-79-21630-5.
- European network of transmission system operators for electricity ENTSO-E, 2010. Ten Year network Development Plan 2010. <https://www.entsoe.eu/major-projects/ten-year-network-development-plan/tyndp-2010/>.
- Fetchenko, M.A., Ovshinsky, S.R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J., Zallen, A., Mays, W. & Ouchi T. 2007. Recent advances in NiMH battery technology. Journal of Power Sources 165: 544–551. http://www.calstart.org/Libraries/Publications/Energy_Storage_Compedium_2010.sflb.ashx.
- Fischer, M. 2011. Superconductors on high seas, Wind Systems Magazine, May. http://windssystemsmag.com/media/pdfs/Articles/2011_May/0511_AMSC.pdf.
- Fortis Bank Nederland, VM Group , 2010. Silver Book 2010. <http://www.virtualmetals.co.uk/pdf/FBNSB0610.pdf>.
- Friends of the Supergrid, 2013. Roadmap to the Supergrid Technologies, Update Report. http://mainstream-downloads.opendebate.co.uk/downloads/WG2_Roadmap_to_the_Supergrid_Technologies_2013_Final_v2.pdf.
- Giordano V., Gangale F., Fulli G., Jimenez M.S., Ouyeyji I., Colta A., Papaioannou I., Mengolini A., Alecu C., Ojala T., Maschio I 2011. Smart grid projects in Europe: lessons learned and current developments.. EC/JRC, 2011.
- Goonan, T.G. 2011. Rare Earth Elements – End Use and Recyclability. Scientific Investigations Report 2011-5094, USGS. <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/pdf/sir2011-5094.pdf>.
- Harris, D.C. & Cabri, L.J. 1991. Nomenclature of platinum-group-element alloys; review and revision. The Canadian Mineralogist 29(2): 231–237.
- Himanen, O. 2013. VTT, henkilökohtainen kommunikointi 14.5.2013.
- Hobbs, P.C.D. 2009. Building Electro-Optical Systems: Making It All Work. John Wiley and Sons, 2nd. Edition.

- Hunt, L.B. & Lever, F.M. 1969. Platinum Metals: A Survey of Productive Resources to industrial Uses. *Platinum Metals Review* 13(4): 126–138.
- Ihonen, J. 2013. VTT, henkilökohtainen kommunikointi 11.2.2013.
- IMOA, International Molybdenum Association. www.imoa.info. Accessed 22.2.2013.
- Irish Scottish Links on Energy Study (ISLES), 2012. <http://www.islesproject.eu/>.
- ITRPV, 2013. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). Results 2012. <http://www.itrpv.net/>.
- Johnson Matthey, 2012: Platinum 2012. <http://www.platinum.matthey.com/publications/pgm-market-reviews/market-review-archive/platinum-2012>.
- JORC, 2012. The JORC Code. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. [http://www.jorc.org/docs/jorc_code2012\(4\).pdf](http://www.jorc.org/docs/jorc_code2012(4).pdf).
- Jüstel, T. 2007. Fluorecent Lamp Phosphors. Is there still news? PGS, Seoul, Korea, March 2007. https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/juestel/juestel/Fluorescent_Lamp_Phosphors-PGS-050307.pdf.
- Kauppila, P., Räisänen, M.L. & Myllyoja, S. 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/37056>.
- Kauranen, P. 2013. VTT, henkilökohtainen kommunikointi 14.2.2013.
- Kauranen, P., Solin, J., Törrönen, K., Koivula, J. & Laurikko, J. 2013. Vetyti kartta – Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle. VTT Tutkimusraportti VTT-R-02257-13. <http://www.tekes.fi/Global/Nyt/Uutiset/Vetyti kartta.pdf>.
- Kihlman, S. GTK, henkilökohtainen yhteydenotto 1.2.2013.
- Konietzko, S. & Gernuks, M. 2011. Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen – Potenzialanalyse für Litium und Kobalt. Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcerverfügbarkeit im Rahmen der BMU-geförderten Projekte LithoRec und LiBRi. Abschlussbericht, Oktober 2011. <http://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/bericht-ressourcenverfuegbarkeit-projektuebergreifend.pdf>.

- Kopera, J.J. 2004. Inside the nickel metal Hydride battery. Cobasys, MI. http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/..%5Cinside_nimh_battery_technology.pdf.
- Laurikko, J. 2012. VTT, henkilökohtainen yhteydenotto 14.12.2012.
- Lewis, C. & Müller, J. 2007. A Direct Drive Wind Turbine HTS Generator, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE.
- Ludwig, G. & Wermusch, G. 1988. Silber, Der Weg des Silbers von den Anfängen der Zivilisation bis zur Gegenwart, Verlag Die Wirtschaft, Berlin.
- Lämmel, C., Schneider, M., Weiser, M. & Michaelis, A. 2013. Investigations of electrochemical double layer capacitor (EDLC) materials – a comparison of test methods. *Mat.-wiss. U. Werkstofftech* 44(7): 641–649.
- Marchetti, J.M., Miguel, V.U. & Errazu, A.F. 2007. Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 1300–1311.
- Masui, Y., Hurikawa, H., Iwasuki, M. & Park, W. 2011. Preparation of YAG: Ce nanocrystals by an environmentally friendly wet process. Effect of Ce³⁺ concentration on photoluminescent property. *Journal of Ceramic Processing Research* 12(3): 348–351 .
- METI, 2009. Press release of 28. July 2009. Announcement of “Strategy for Ensuring Stable Supplies of Rare Metals”. http://www.meti.go.jp/english/press/data/20090728_01.html.
- MIT, 2010. Strategies and perspectives for securing Rare Metals in Korea – a talk by Dr Jung-Chan Bae of the Korea Institute of Industrial Technology. From: MIT Energy Initiative Workshop Report, Critical elements for new energy technologies. Available here: http://web.mit.edu/miteicomm/web/reports/critical_elements/CritElem_Report_Final.pdf
- Morley, N. & Etherley, D. 2008. Material Security, Ensuring Resource Availability for the UK Economy. http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/material_security.pdf.
- Moskalyk, R.R. 2003. Gallium the backbone of the electronics industry. *Minerals Engineering* 16(10): 921.
- Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P. & Kooroshy, J. 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies, JRC SETIS. ISBN 978-92-79-20698-6.

- Nylund, N.-O. 2011. Sähköautojen tulevaisuus Suomessa. Sähköautot liikenne- ja ilmastopolitiikan näkökulmasta. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 12/2011. <http://www.lvm.fi/julkaisu/1230128/sahkoautojen-tulevaisuus-suomessa-sahkoautot-liikenne-ja-ilmastopolitiikan-nakokulmasta>.
- Näringsdepartementet, 2013. Sveriges Mineralstrategi. För ett hållbart nyttjande av Sveriges mineraltillgångar som skapar tillväxt i hela landet. <http://www.regeringen.se/content/1/c6/20/96/57/14fbe930.pdf>.
- Nærings- og handelsdepartementet, 2013. Strategy for the Mineral Industry. http://www.regjeringen.no/pages/38262123/strategyforthemineralindustry_2013.pdf.
- Oakdene Hollins, 2010. Lanthanide Resources and Alternatives. http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/lanthanide_resources_and_alternatives_may_2010.pdf.
- PBL, 2011. Scarcity in the Sea of Plenty? Global Resource Scarcities and Policies in the European Union and the Netherlands. <http://www.pbl.nl/en/publications/2011/Scarcity-in-a-Sea-of-Plenty-Global-Resource-Scarcities-and-Policies-in-the-European-Union-and-the-Netherlands>.
- Perles, T. 2012. Vanadium Market Fundamentals and Implications. Metal Bulletin 28th International Ferroalloys Conference. 13th Nov. 2012, Berlin, Saksa. <http://www.motivmetals.com/Documents/Vanadium%20-%20Terry%20Perles%20TTP%20Squared%20Inc%20%20Text%20and%20Slides.pdf>.
- Polinares, 2012. Fact Sheet: Indium. POLINARES Working Paper nr. 39. www.polinares.eu.
- Polinares – EU Policy on Natural Resources. <http://www.polinares.eu/index.php>. Luettu 15.4.2013.
- Polinder, H., Bang, D.-J., Li, H. & Chen, Z. 2007. Concept Report on Generator Topologies, Mechanical & Electromagnetic Optimazation. Project UpWind, contract No: 019945 (SES6), 6th (EC) RTD Framework Programme.
- Presentation, Jung-Chan Bae, Strategies and Perspectives for Securing Rare Metals in Korea in: Critical Elements for New Energy Technologies. An MIT Energy Initiative Workshop Report, 29. April 2010. http://web.mit.edu/miteicomm/web/reports/critical_elements/CritElem_Report_Final.pdf.
- Pippuri, J. 2013. VTT, henkilökohtainen kommunikointi, 14.5.2013.

- Rayner-Canham, G. & Overton, T. 2006. Descriptive Inorganic Chemistry, 5th Ed. W.H. Freeman and Company, 2006. ISBN 978-1-4292-2434-5.
- Reich, L.S. 2002. The making of American Industrial Research: Science and Business at Ge and Bell, 1876–1926. ISBN 9789521522373. S. 117.
- Reinikainen, M. 2013. VTT, henkilökohtainen yhteydenotto 15.3.2013.
- Remick, R.J., Wheeler, D. & Singh, P. 2009. MCFC and PAFC R&D Workshop. Summary Report. Nov. 15th 2009, Palm Springs, California, USA. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mcfc_pafc_workshop_summary.pdf.
- Resnick Institute. 2011. California Institute of Technology. Critical Materials for Sustainable Energy Applications. http://resnick.caltech.edu/learn/docs/ri_criticalmaterials_report.pdf.
- Riedel, E. (ed.), Janiak, C., Klapötke, T.M. & Meyer, H.-J. 2007. Moderne Anorganische Chemie, 2. painos, De Gruyter Verlag 2007. ISBN 3110178389.
- Robertson, N. 2006. Optimizing dyes for Dye-Sensitised Solar Cells. *Angew.Chem. Int.Ed.* 45: 2338–2345.
- Ronda, C.R. 1995. Phosphors for lamps and displays: an applicational view. *Journal of Alloys and Compounds* 225: 534–538.
- Rudnick, R. L. & Gao, S. 2003. Composition of the Continental Crust. Chapter 3.01 In: *Geochemistry, Volume 3*. Editor: Roberta L. Rudnick. Executive Editors: Heinrich D. Holland and Karl K. Turekian. ISBN 0-08-043751-6. Elsevier, 2003. S. 1–64.
- Råde, I. & Andersson, B.A. 2001. Requirement for metals of electric vehicle batteries. *Journal of Power Sources* 93: 55–71.
- Savin, H. 2013. Aalto-yliopisto, henkilökohtainen yhteydenotto, 16.4.2013.
- Savolainen, I., Similä, L., Syri, S. & Ohlström M. (toim.). 2008. Teknologiaopolut 2050. Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. VTT Tiedotteita 2432. VTT, Espoo. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2432.pdf>.
- Scholand, M.J. & Dillon, H.E. 2012. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/1044508>.

- Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S. & Merz, C. Study on Rare Earths and Their Recycling. Darmstadt, 2011. <http://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf>.
- Selenium Tellurium Development Association STDA, www.stda.org. accessed 25.2.2013.
- Simmons, J., Achzet, B., Reller, A., Zepf, V., Rennie, C. & Ashfield, M. 2011. Materials critical to the energy industry. An introduction. http://www.physik.uni-augsburg.de/lehrestuehle/rst/downloads/Materials_Handbook_Rev_2012.pdf.
- Singh, R.N., Mishra, D., Anindita, Sinha, A.S.K., Singh, A. 2007. Novel electrocatalysts for generating oxygen from alkaline water electrolysis. *Electrochemistry Communications* 9: 1369–1373.
- Sipilä, K. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa: työryhmän mietintö. KTM Julkaisuja 11/2006. ISSN 1459-9376. http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/92AA9268109E88ECC2257180002A497E.
- Statistics Netherlands, 2010. Critical materials in the Dutch economy – Preliminary results. <http://www.cbs.nl/NR/rdonlyres/37ADC207-2FD4-4D34-B5DE-02A3ADBDF3B4/0/criticalmaterialsinthedutcheconomy.pdf>.
- Steele, B.C.H. & Heinzl, A. 2001. Materials for fuel-cell technologies. *Nature* 414: 345–352.
- Stone, F.G.A. & West, R. (Eds.). 1980. *Advances in organometallic chemistry*. Vol. 18. New York [etc.]. London: Academic Press.
- Strömberg, L., Lindgren, G., Jacoby, J., Giering, R., Anheden, M., Burchhardt, U., Altmann, H., Kluger, F. & Stamantelopoulos, G.-N. 2009. Update on Vattenfall's 30 MW_{th} Oxyfuel Pilot Plant in Schwarze Pumpe. *Energy Procedia* 1: 581–589.
- Suomen mineraalistrategia, 2010. Kirjapaino Keili Oy, Vantaa 2010. www.mineraalistrategia.fi.
- Tanabe, S., Fujita, S., Yoshihara, S., Sakamoto, A., Yamamoto, S. 2005. YAG glass-ceramic phosphors for white LED (II): Luminiscence characteristics. *Proc. of SPIE* Vol. 5941.
- Teir, S., Arasto, A., Tsupari, E., Koljonen, T., Kärki, J., Kujanpää, L., Lehtilä, A., Nieminen, M. & Aatos, S. 2011. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin

(CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa. VTT Tiedotteita 2576. ISBN 978-951-38-7697-5.

Tähkämö, L. 2013. henkilökohtainen keskustelu 14.4.2013.

U.S. Department of Energy, 2011. Critical Materials Strategy. <http://energy.gov/pi/office-policy-and-international-affairs/downloads/2011-critical-materials-strategy>.

USGS, 2008a. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Indium <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2008-indiu.pdf>.

USGS, 2008b. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Niobium. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2008-niobi.pdf>.

USGS, 2008c. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Tantalum. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2008-tanta.pdf>.

USGS, 2009a. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Platinum-group metals. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2009-plati.pdf>.

USGS, 2009b. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Fluorspar. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/fluorspar/mcs-2009-fluor.pdf>.

USGS, 2009c. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Molybdenum. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/mcs-2009-molyb.pdf>.

USGS, 2009d. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Vanadium. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/vanadium/mcs-2009-vanad.pdf>.

USGS, 2011a. 2010 Minerals Yearbook, Litium. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/myb1-2010-lithi.pdf>.

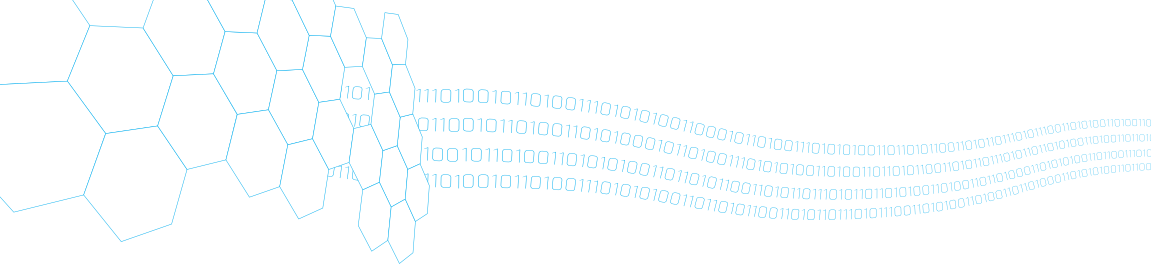
USGS, 2011b. 2010 Minerals Yearbook, Cobalt. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/myb1-2011-cobal.pdf>.

- USGS, 2012a. 2011 Minerals Yearbook, Selenium and tellurium. Sept. 2012
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/myb1-2011-selen.pdf>.
- USGS, 2012b. 2011 Minerals Yearbook, Germanium. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/myb1-2011-germa.pdf>.
- USGS, 2012c. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Lithium.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2012-lithi.pdf>.
- USGS, 2013a. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Vanadium.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/vanadium/mcs-2013-vanad.pdf>.
- USGS, 2013b. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Tellurium
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/mcs-2013-tellu.pdf>.
- USGS, 2013c. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Indium
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2013-indiu.pdf>.
- USGS, 2013d. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Gallium
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2013-galli.pdf>.
- USGS, 2013e. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Germanium.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/mcs-2013-germa.pdf>.
- USGS, 2013f. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Silver.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/mcs-2013-silve.pdf>.
- USGS, 2013g. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths.
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/mcs-2013-raree.pdf.
- USGS, 2013h. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Cobalt.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2013-cobal.pdf>.
- USGS, 2013i. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Platinum-group metals. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2013-plati.pdf>.

- USGS, 2013j. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Fluorspar. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/fluorspar/mcs-2013-fluor.pdf>.
- USGS, 2013k. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Molybdenum. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/mcs-2013-molyb.pdf>.
- USGS, 2013l. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Niobium. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2013-niobi.pdf>.
- USGS, 2013m. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Tantalum. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2013-tanta.pdf>.
- Von Helmholtz, R. & Eberle, U. 2007. Fuel cell vehicles: Status 2007. *Journal of Power Sources* 165: 833–843.
- Vuorilehto, K. 2013. Aalto-yliopisto, henkilökohtainen kommunikointi, 18.10.2013.
- Weeks, M.E. 1968. Discovery of the Elements (7 ed.). *Journal of Chemical Education*. S. 385–407.
- Wojtalewicz-Kasprzak, A. 2007. Erzeugung von synthetischen Seltenen-Erd-Konzentraten aus Leuchtstoffabfällen. Väitöskirja, Technische Universität Clausthal, 2007.
- Wollaston, W.H. 1804. On a New Metal, Found in Crude Platina. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 94: 419–430.
- Zeng, K. & Zhang, D. 2010. Recent Progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Consumption Science* 36: 307–326.
- Zissis, G. & Kitsinelis, S. 2009. State of the art on the science and technology of electrical light sources: from the past to the future. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42: 173001.
- Züttel, A. 2007. Hydrogen storage and distribution systems. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 12: 343–365.

Nimeke	Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa
Tekijä(t)	Leena Grandell
Tiivistelmä	<p>Käsillä oleva julkaisu on syntynyt osana "Low Carbon Finland 2050 -platform" hanketta. Hankkeessa luodaan vankkoja tiekarttoja vähähiiliselle ja kilpailukykyiselle yhteiskunnalle sekä tarkastellaan vihreän teknologiaan liittyvän kasvun edellytyksiä. Hankkeen osapuolina toimivat VTT, Valtion taloudellinen tutkimuskeskus (VATT), Metsäntutkimuslaitos (Metla) ja Geologian tutkimuskeskus (GTK) koordinaation ollessa VTT:n vastuulla. Hanke kuuluu Tekesin Green Growth – Tie kestäväään talouteen – ohjelmaan.</p> <p>Hanke koostuu seuraavista osakokonaisuuksista</p> <ul style="list-style-type: none">• arvioidaan strategisia luonnonvaroja ja niiden resursseja painottuen metsä- ja mineraalivaroihin,• tuotetaan skenaarioita vaihtoehtoisista kehityspoluista vähähiiliselle yhteiskunnalle vuoteen 2050 asti sekä• kehitetään yhteistoimintamalli eli platform, joka voisi toimia interaktiivisena "vihreän talouden tulevaisuusfoorumina". <p>Painopiste tarkasteluissa on Suomen kehityksessä, mutta projektissa tuotetaan myös globaaleja skenaarioita. Käsillä oleva raportti toimii skenaarioiden taustamateriaalina keskittyen kriittisten metallien tarpeeseen vihreissä energiateknologioissa. Tarkasteltaviksi teknologioiksi on valittu seuraavat: aurinkosähkö, tuulivoima, hiilidioksidin talteenotto, ydinvoima, biopoltonesteet, polttokennot, akut, elektrolyysi, vetyvarastot, sähköverkko (supergrid ja smart grid), sähköautot ja energiatehokas valaistus. Taustamateriaalia hyödynnetään globaaleissa tarkasteluissa, joissa arvioidaan kriittisten metallien kysyntää ja sen kehittymistä maailman markkinoilla, mikäli siirtymä vähähiiliseen yhteiskuntaan toteutuu. Kysyntää verrataan tiedossa oleviin geologisiin varantoihin. Skenaariotarkasteluiden tulokset esitellään toisaalla.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-8137-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN 2242-122X (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)
Julkaisuaika	Maaliskuu 2014
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	86 s. + liitt. 2 s.
Projektin nimi	
Toimeksiantajat	
Avainsanat	Critical metals , reserves, resources, low carbon society, clean energy technology
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, Puh. 020 722 111

Title	Critical metals in clean energy technology
Author(s)	Leena Grandell
Abstract	<p>This publication is a partial outcome of the "Low Carbon Finland 2050 -platform" project. The main objectives of the project are to generate road maps towards a low carbon and a competitive society and to evaluate the requirements for growth employing green technologies. The project is coordinated by VTT, with other participants from the Government Institute for Economic Research (VATT), Finnish Forest Research Institute (Metla), and Geological Survey of Finland (GTK). The project is a part of the Green Growth program funded by Tekes.</p> <p>The project consists of the following tasks:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Assessment of strategic resources with an emphasis on forest and mineral resources, • Generating scenarios for alternative development paths to low carbon society until year 2050, and • Development of a cooperative platform which could act as an interactive "green economy future forum". <p>The emphasis in the evaluations is in the development in Finland, but the project will also generate global scenarios. This report acts as supporting material concentrating on the need for critical metals in clean energy technologies. Following technologies have been selected for an evaluation: solar electricity, wind power, carbon capture and storage, nuclear power, biofuels, fuel cells, batteries, electrolysis, hydrogen storages, grids (supergrid and smart grid), electric cars, and energy efficient lighting. This supporting material will be employed in the global evaluations, assessing the demand for critical metals in the global markets, in case of a transition to a low carbon society. The demand for metals is compared to the known geological reserves. The results of the scenario evaluations will be presented separately.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-8137-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN 2242-122X (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)
Date	March 2014
Language	Finnish, English abstract
Pages	86 p. + app. 2 p.
Name of the project	
Commissioned by	
Keywords	Critical metals , reserves, resources, low carbon society, clean energy technology
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111



Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa

ISBN 978-951-38-8137-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-122X (verkkojulkaisu)

