

# KRIITTISET MATERIAALIT TEKNOLOGIAATEOLLISUUDESSA



## SISÄLLYSLUETTELO

|                 |                                                                        |           |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>       | <b>Selvityksen tausta ja tavoite</b>                                   | <b>3</b>  |
| <b>2.</b>       | <b>Kriittisyyteen vaikuttavat tekijät</b>                              | <b>4</b>  |
| 2.1             | EU:n määrittely kriittisille raaka-aineille                            | 4         |
| 2.2             | Kysynnän voimakas kasvu                                                | 5         |
| 2.3             | Gloaali kilpailu raaka-aineista                                        | 5         |
| <b>3.</b>       | <b>Kriittiset metallit</b>                                             | <b>7</b>  |
| 3.1             | EU kriittiset raaka-aineet                                             | 7         |
| 3.2             | Kriittisten raaka-aineiden tuotanto                                    | 8         |
| 3.3             | EU:n kriittisten raaka-aineiden hankinta                               | 10        |
| 3.4             | Muut teollisuudelle kriittiset materiaalit                             | 11        |
| <b>4.</b>       | <b>Strategiset sektorit sekä avainteknologiat</b>                      | <b>13</b> |
| 4.1             | Avainteknologiat                                                       | 13        |
| 4.1.1           | Litiumioniakut                                                         | 13        |
| 4.1.2           | Polttokennot                                                           | 13        |
| 4.1.3           | Tuulivoima                                                             | 14        |
| 4.1.4           | Sähkövetomootorit (kestomagneetti)                                     | 14        |
| 4.1.5           | Aurinkosähköteknologia                                                 | 15        |
| 4.1.6           | Robotiikka                                                             | 16        |
| 4.1.7           | Dronet                                                                 | 16        |
| 4.1.8           | 3D-tulostus                                                            | 17        |
| 4.1.9           | Digitaaliset teknologiat                                               | 18        |
| 4.1.10          | Yhteenveto                                                             | 20        |
| 4.2             | Strategiset sektorit                                                   | 21        |
| 4.2.1           | Uusiutuvan energian toimiala                                           | 21        |
| 4.2.2           | Sähköinen liikkuminen                                                  | 22        |
| 4.2.3           | Puolustus ja ilmailu                                                   | 23        |
| 4.3             | Arvoketjut ja toimitusriskit                                           | 23        |
| <b>5.</b>       | <b>Kriittisten metallien tuotanto Suomessa</b>                         | <b>26</b> |
| <b>6.</b>       | <b>Raaka-ainehankintojen riskinhallintastrategiat yrityksissä</b>      | <b>31</b> |
| <b>7.</b>       | <b>Kriittisten metallien kierrätystilanne EU:ssa</b>                   | <b>36</b> |
| <b>8.</b>       | <b>Kysely suomalaisille teollisuusyrityksille</b>                      | <b>38</b> |
| 8.1             | Verkkokyselyn toteutus                                                 | 38        |
| 8.2             | Suomalaisille yrityksille kriittiset metallit                          | 38        |
| 8.3             | Kriittisten metallien hankinta                                         | 41        |
| 8.4             | Suomalaisten yritysten näkemys kriittisyyden taustatekijöistä          | 42        |
| 8.5             | Todennäköisimmät syyt markkinahäiriöille                               | 43        |
| 8.6             | Yritysten riskienhallintasuunnitelmat                                  | 43        |
| 8.7             | Ukrainan sodan vaikutukset                                             | 44        |
| <b>9.</b>       | <b>Johtopäätökset</b>                                                  | <b>46</b> |
| <b>Liite 1.</b> | <b>Kriittisten metallien ominaisuudet ja käyttökohteet</b>             | <b>48</b> |
| <b>Liite 2.</b> | <b>Kriittisten raaka-aineiden merkitys teollisille ekosysteemeille</b> | <b>55</b> |

**Julkaisuvuosi: 2022**

**Tekijät: Ying Zhu, Anna Eskola, Essi Rännäli, Ramboll Finland Oy**

# 1. SELVITYKSEN TAUSTA JA TAVOITE

”Kriittiset metallit, materiaalien uudelleenkäyttö ja huoltovarmuus” -esiselvitys toteutettiin lokakuun 2016 ja maaliskuun 2017 välisenä aikana Huoltovarmuuskeskuksen toimeksiantona. Esiselvityksen tavoitteena oli luoda tilannekuva siitä, mitkä ovat suomalaisten teollisuusyritysten oman toiminnan jatkuvuuden kannalta kriittisiä metalleja ja metalliyhdisteitä, miten näiden materiaalien saatavuuteen liittyviä riskejä on hallittu ja miten yritykset näkevät yhteistyön merkityksen teollisuuden toiminnan jatkuvuuden näkökulmasta. Huomiota kiinnitettiin myös kriittisten metallien ja muiden metallien kierrätykseen.

Esiselvityksen perusteella yritykset ovat pääosin tietoisia kriittisten metallien saatavuuteen liittyvistä riskeistä, kuten materiaalien varantojen ja valmistuksen keskittymisestä voimakkaasti tiettyihin maihin. Haasteena on, että vaikka riskeistä ollaan tietoisia, yritykset näyttävät olevan liiankin luottavaisia kriittisten metallien saatavuuteen. Monien kriittisten metallien osalta Kiinan ylituotannon ja matalien markkinahintojen vuoksi kierrätysratkaisuihin ei juurikaan investoida, vaikka esimerkiksi Euroopan unioni on korostanut kierrätyksen merkitystä.

Esiselvityksen mukaan Euroopan unioni on pyrkinyt nostamaan keskusteluun EU:n heikkoa omavaraisuutta kriittisten materiaalien suhteen. Monien keskeisten teknologioiden kannalta kriittisten materiaalien varannot ja jalostustoiminta on globaalisti keskittynyt harvojen maiden käsiin. Edellisen vuonna 2017 laaditun ”Kriittiset metallit ja huoltovarmuus” -selvityksen aikaan useimpien kriittisten metallien ja metalliyhdisteiden saatavuus oli hyvä ja hinnat olivat olleet pitkän aikavälin vertailussa edullisella tasolla.

Tilanne on muuttunut vuodesta 2017 nopeasti. Vuoden 2020 alussa alkoi COVID-pandemia ja helmikuussa 2022 Venäjä hyökkäsi Ukrainaan. Nämä tapahtumat herättivät karulla tavalla koko maailman siihen, että saatavuusriskit voivat ja ovatkin toteutuneet. Samalla Eurooppa pyrkii hiilineutraaliuteen ja vihreään siirtymään, mikä tulee kasvattamaan kriittisten metallien kysyntää merkittävästi. Näiden muutosten vaikutuksen selvittämiseksi Teknologiateollisuus ry on tilannut Ramboll Finland Oy:ltä päivityksen ”Kriittiset metallit ja huoltovarmuus” -raporttiin. Päivityksen tavoitteena on ollut:

- kerätä ajankohtaiset ja keskeiset tiedot kriittisistä metalleista;
- tehdä tilannekatsaus suomalaisten yritysten kyvystä hallita poikkeustilanteita;
- auttaa pieniä ja keskisuuria yrityksiä kehittämään osaamistaan.

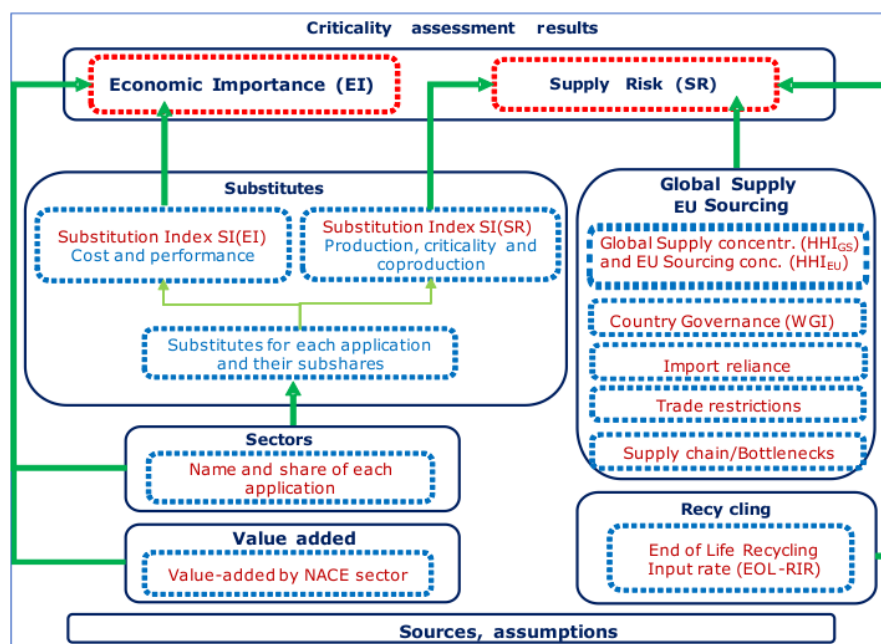
## 2. KRIITTISYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

### 2.1 EU:n määrittely kriittisille raaka-aineille

Euroopan unioni on käynnistänyt Raw Materials Initiative -ohjelman, jonka tavoitteena on ratkaista raaka-aineisiin liittyviä haasteita EU-tasolla. Yksi aloitteen keskeisistä tehtävistä on määritellä, mitkä raaka-aineet ovat kriittisiä EU:n taloudelle (kuva 1).

Metallien kriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä on useita, ja yksi keskeinen kysymys liittyy metallin saatavuuteen. Saatavuutta voidaan tarkastella toimitusriskin kautta (*eng. supply risk=SR*). Toimitusriskissä tarkastellaan primäärraaka-aineiden maailmanlaajuisen tuotannon ja hankinnan maataso<sup>1</sup> keskittymistä EU:hun, toimittajamaiden hallintoa, mukaan lukien ympäristönäkökohdat, kierrätyksen (eli uusioraaka-aineiden) osuutta, korvaamista, EU:n tuontiriippuvuutta, sekä tuontirajoituksia kolmansissa maissa. Toimitusriskiin vaikuttavat toisaalta tunnetut geologiset varannot, sekä varantojen maantieteellinen jakautuneisuus. Poliittinen epästabiilitetti tuottajamaissa, sekä ympäristölainsäädäntöön liittyvät kysymykset saattavat tuoda lisää epävarmuustekijöitä. Esimerkiksi harvinaisten maametallien tuotanto keskittyy länsimaiden tiukentuneen ympäristölainsäädännön vuoksi pitkälti Kiinaan. Kiinan harvinaisten maametallien 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 etenee hitaasti. Korkea metallin kierrätysaste ja kierrätetyn metallin osuus kokonaistuotannosta toisaalta lieventävät toimitusriskiä.

Toinen kriittisyyden määrittelylle keskeinen kysymys liittyy metallien taloudelliseen merkitykseen (*eng. economic importance=EI*). Taloudellinen merkitys tarkastelee yksityiskohtaisesti raaka-aineiden kohdentamista loppukäyttöön perustuen teollisiin sovelluksiin ja sen korvaavien tuotteiden suorituskykyyn näissä sovelluksissa.



Kuva 1. Kriittisyydmetodologian yleinen rakenne Euroopan komission tekemän selvityksen mukaan<sup>2</sup>.

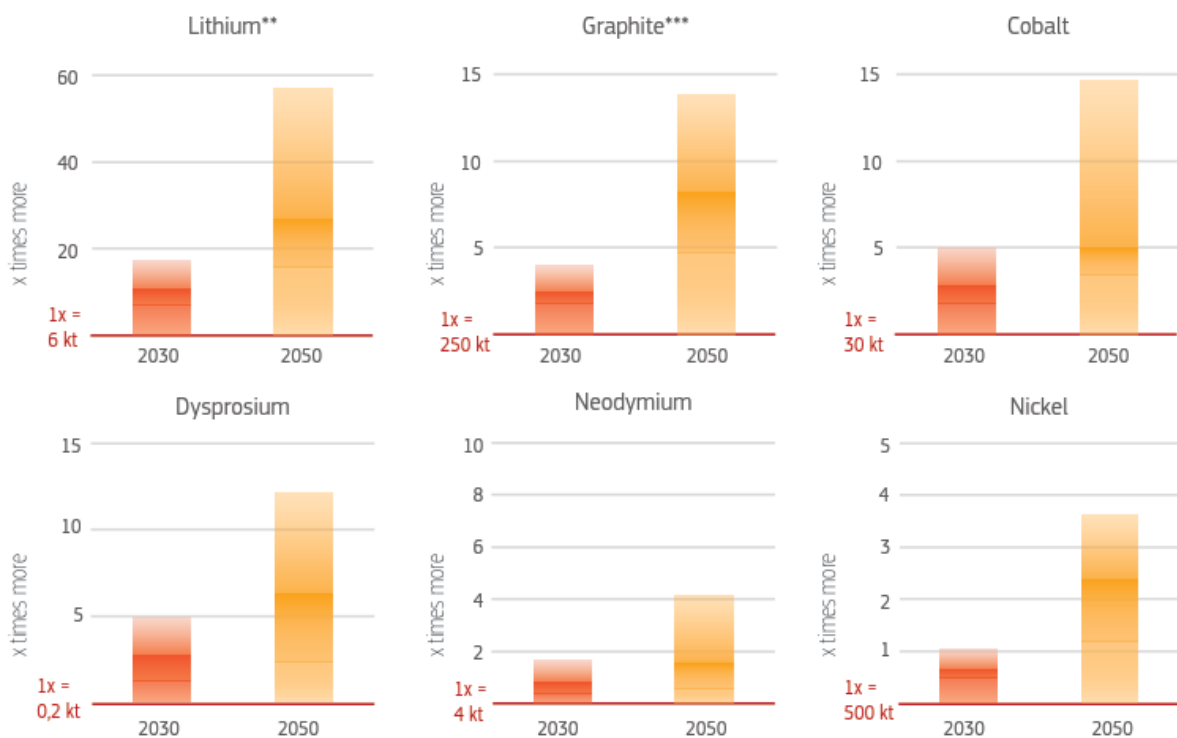
<sup>1</sup> EU methodology uses the Worldwide Governance Indicators (WGI): <http://info.worldbank.org/governance/wgi/>. WGI is addressing environmental aspects under the Government Effectiveness and Regulatory quality indicators.

<sup>2</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

## 2.2 Kysynnän voimakas kasvu

Globaalissa energiamuutoksessa tuuliturbiinien, aurinkopaneelien, akkujen ja vedyn tuotannon ja varastoinnin, sekä muiden järjestelmien valmistukseen tarvittavien metallisten raaka-aineiden kulutus kasvaa voimakkaasti (kuva 2). Siirtyminen sähköiseen liikkumiseen vaatii akkuja, polttokennoja ja kevyitä vetomoottoreita paitsi autoihin, myös sähköpyöriin, skoottereihin kuin raskaaseen liikenteeseenkin. Strategisesti tärkeät puolustus- ja ilmailusektorit ovat edelleen teknologisen kehityksen eturintamassa, ja vaativat runsaasti sekä kriittisiä metalleja, että perusmetalleja. EU:n komission tekemän ennakoititutkimuksen mukaan:

- Sähköajoneuvojen akkuja ja energian varastointia varten EU tarvitsisi vuonna 2030 jopa 18 kertaa enemmän litiumia ja 5 kertaa enemmän kobolttia ja vuonna 2050 lähes 60 kertaa enemmän litiumia ja 15 kertaa enemmän kobolttia verrattuna koko EU:n nykyiseen talouteen. Kestomagneeteissa, esimerkiksi sähköajoneuvoissa, digitaali-teknikoissa ja tuuligeneraattoreissa käytettävien harvinaisten maametallien kysyntä voi kymmenkertaistua vuoteen 2050 mennessä. Ellei tähän puututa, kysynnän kasvu voi johtaa tarjontaongelmiin tulevaisuudessa<sup>3</sup>.



Kuva 2. Yhdistetty kriittisten raaka-aineiden käyttö eri teknologioissa (akut, polttokennot, tuuliturbiinit ja aurinkosähkö ja sähköinen liikkuvuus) EU:ssa vuosina 2030 ja 2050 verrattuna materiaalin nykyiseen EU:n kulutukseen<sup>4</sup>.

## 2.3 Globaali kilpailu raaka-aineista

Monilla kriittisillä materiaaleilla on erilaisia sovelluksia useilla teollisuuden aloilla, mukaan lukien uusiutuva energia, sähköinen liikkuvuus, puolustus-, ilmailu- ja digitaalisektorit sekä lääketieteen, kemian ja petrokemian aloilla. Kilpailu samoista raaka-aineista, jalostetuista materiaaleista ja komponenteista lisääntyy kaikkien sektoreiden välillä. Tämä koskee esimerkiksi kriittisiä raaka-

<sup>3</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.europa.eu)

<sup>4</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.europa.eu)

aineita, kuten boraatteja, galliumia, indiumia, harvinaisia maametalleja, kobolttia, niobiumia ja piimetallia.

Tämä on nähtävä globaalissa kontekstissa, jossa raaka-aineiden kysyntä kasvaa väestönkasvun, teollistumisen, liikenteen, energiajärjestelmien ja muiden teollisuudenalojen hiilidioksidipäästöjen vähentämisen, sekä kehitysmaiden kasvavan kysynnän ja uusien teknologisten sovellusten vuoksi. Maailmanpankki ennustaa, että metallien ja mineraalien kysyntä kasvaa nopeasti ilmastotavoitteiden myötä. Merkittävin esimerkki tästä on sähköakut, joissa metallien, kuten alumiinin, kobolttin, raudan, lyijyn, litiumin, mangaanin ja nikkelin kysynnän kasvu kasvaisi yli 1000 prosenttia vuoteen 2050 mennessä 2 °C:n ilmastoskenaariossa verrattuna tilanteeseen, jossa lämpötilan nousun eteen ei tehtäisi toimenpiteitä. OECD ennustaa, että materiaali-intensiteetin ja resurssitehokkuuden parantumisesta ja palvelujen osuuden kasvusta huolimatta metallien maailmanlaajuinen käyttö kasvaa 8 miljardista 20 miljardiin tonniin vuonna 2060 (+150 %). Kriittisen materiaalien osalta käydään kauppaa kansainvälisillä markkinoilla, ja keskeiset maat, kuten Yhdysvallat ja Kiina, ovat joidenkin mineraalien osalta riippuvaisia tuonnista (esim. niobiumin, kromin, tantaalin osalta), niiden saatavuus EU:hun saattaa muuttua entistä haasteellisemmaksi. Kilpailu raaka-aineiden saatavuudesta kiristyy, kun siirrytään kohti vähähiilistä taloutta uusien teollisuusstrategioiden mukaisesti<sup>5</sup>.

Lisäksi kriittisten materiaalien arvoketjun näkökulmasta tarkasteltuna materiaalinkäsittelyn ja lopputuotteiden valmistuksen eri vaiheet lisäävät toimitusvarmuuden monimutkaisuutta. Materiaaliriippuvuuden osalta toimitusvarmuutta on siksi tarkasteltava toimitusketjun kautta ottaen huomioon toimitusketjun eri vaiheiden ja maailman eri alueiden väliset yhteydet.

<sup>5</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](#)

### 3. KRIITTISET METALLIT

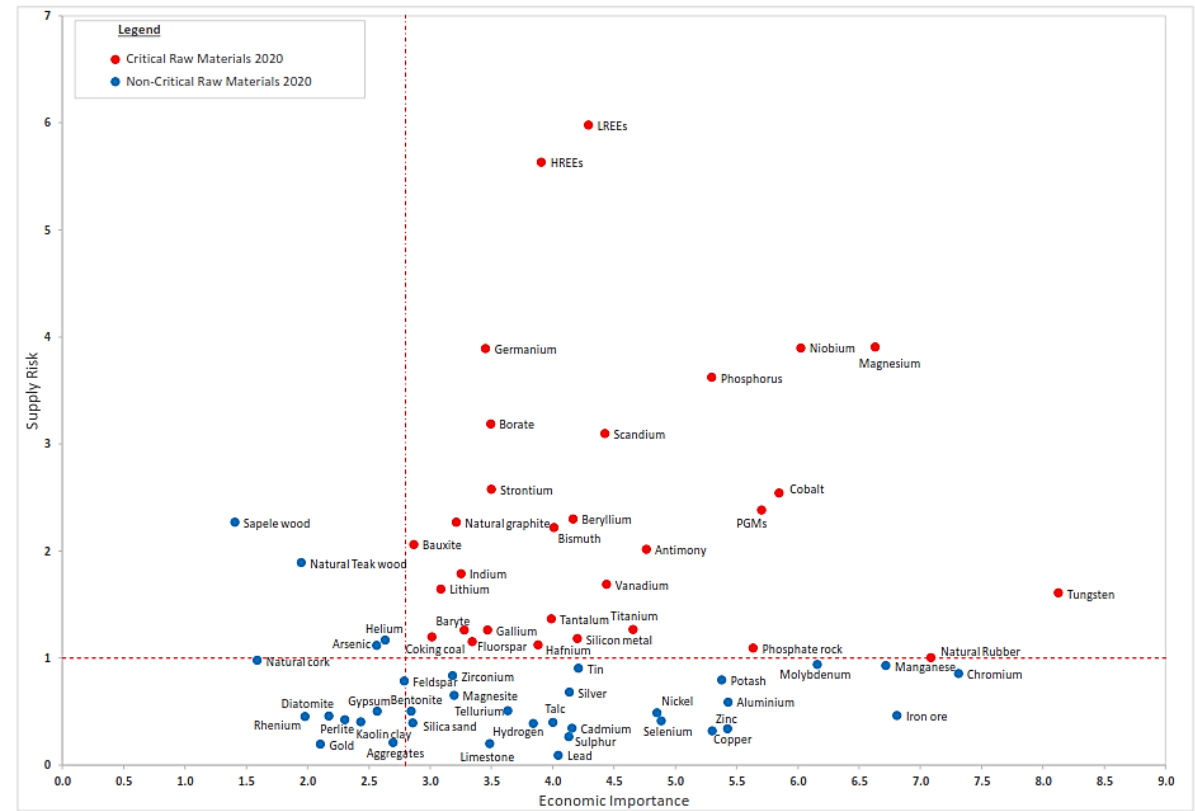
#### 3.1 EU kriittiset raaka-aineet

Ensimmäinen EU:n kriittisten raaka-aineiden määritelmä on vuodelta 2011 ja listaa raaka-aineista on päivitetty sen jälkeen joka kolmas vuosi. Viimeisin lista on vuodelta 2020 (taulukko 1).

Taulukko 1. Kolmekymmentä raaka-ainetta, jotka on arvioitu EU:ssa kriittisiksi vuoden 2020 listauksen mukaan<sup>6</sup>. Suluissa ovat alkuaineiden kemialliset merkit.

|                |                                 |                |
|----------------|---------------------------------|----------------|
| Antimoni (Sb)  | Hafnium (Hf)                    | Fosfori (P)    |
| Baryytti       | Raskaat harvinaiset maametallit | Skandium (Sc)  |
| Beryllium (Be) | Kevyet harvinaiset maametallit  | Pii (Si)       |
| Vismutti (Bi)  | Indium (In)                     | Tantaali (Ta)  |
| Boraatti       | Magnesium (Mg)                  | Volframi (W)   |
| Koboltti (Co)  | Luonnon grafiitti               | Vanadiini (V)  |
| Koksi          | Luonnonkumi                     | Bauksiitti     |
| Fluoriitti     | Niobium (Nb)                    | Litium (Li)    |
| Gallium (Ga)   | Platinaryhmän metallit          | Titaani (Ti)   |
| Germanium (Ge) | Fosfaattikivi                   | Strontium (Sr) |

Kriittisten raaka-aineiden luettelo laaditaan niiden raaka-aineiden perusteella, jotka saavuttavat tai ylittävät sekä toimitusriskin että taloudellisen merkittävyyden kynnysarvot. Raaka-aineilla ei ole kriittisyyden kannalta järjestystä (kuva 3).



Kuva 3. Kriittisyyden arviointien kokonaistulokset, jotka on kartoitettu kriittisyydskynnyksiin. Kriittiset raaka-aineet on korostettu punaisilla pisteillä ja ne sijaitsevat kriittisyydsvyöhykkeellä ( $SR \geq 1$  ja  $EI \geq 2,8$ ). Siniset pisteet edustavat ei-kriittisiä raaka-aineita<sup>7</sup>.

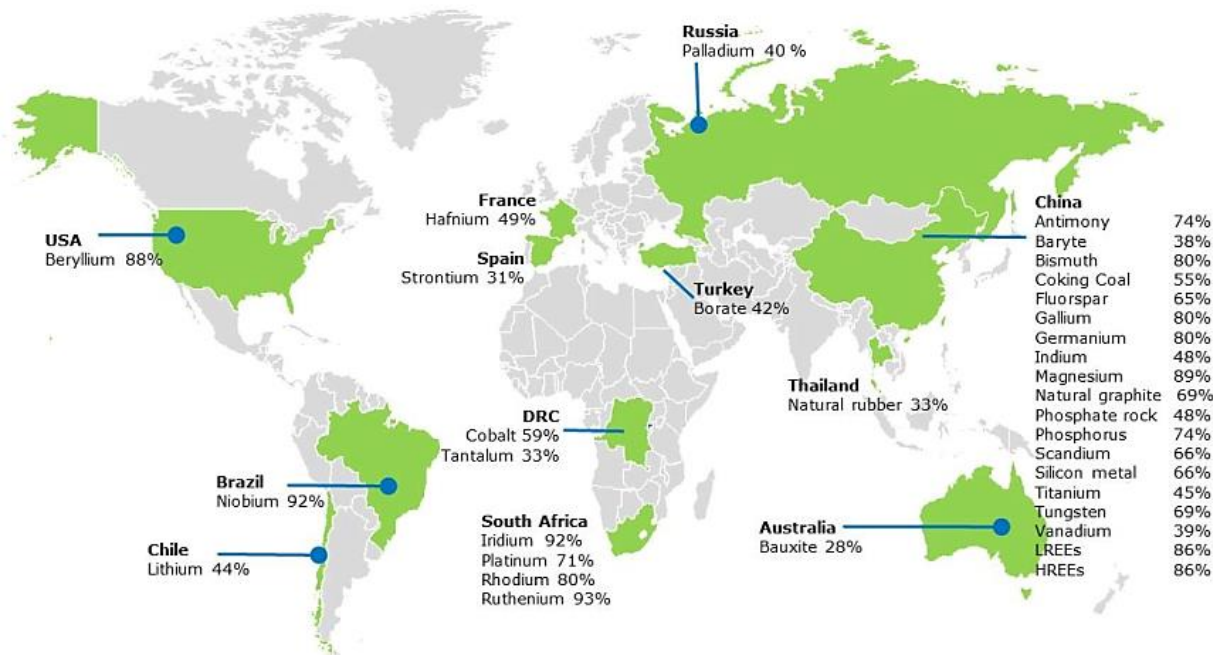
<sup>6</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

<sup>7</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

On huomioitava että, kaikki raaka-aineet ovat tärkeitä EU:n taloudelle, vaikka niitä kaikkia ei pidettäisi tällä hetkellä kriittisinä. Tietyn raaka-aineen luokittelu ei-kriittiseksi ei tarkoita, että sen saatavuutta ja merkitystä EU:n taloudelle voitaisiin jättää huomiotta (kuva 3). Myös tiedon lisääntyminen ja mahdollinen kehitys EU:n sekä kansainvälisillä markkinoilla voivat vaikuttaa kriittisten raaka-aineiden luetteloon tulevaisuudessa.

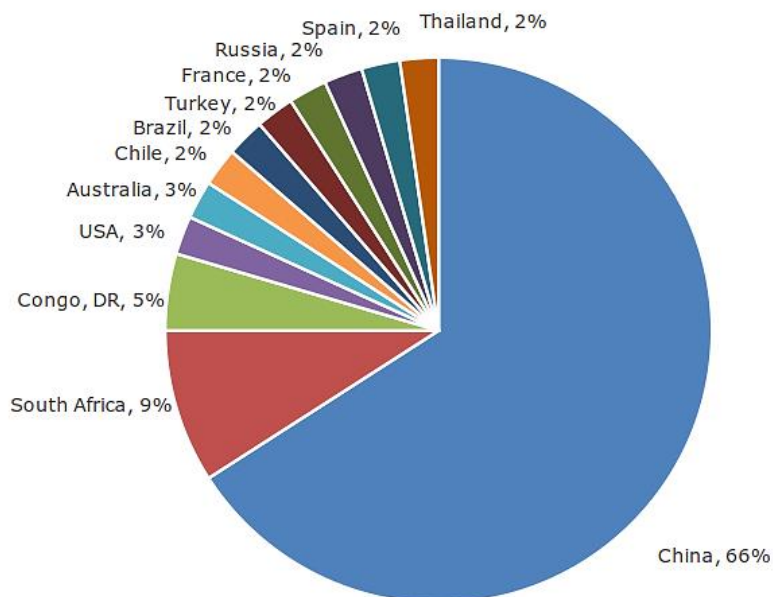
### 3.2 Kriittisten raaka-aineiden tuotanto

Maailmanlaajuinen tarkastelu soittaa, että Kiina on kriittisten raaka-aineiden suurin globaali toimittaja (kuva 4, kuva 5). Tarkastelussa on mukana kaikki harvinaiset maametallit (REE:t) ja muut kriittiset raaka-aineet, kuten magnesium, volframi, antimoni, gallium ja germanium. Kiinan lisäksi useat muut maat ovat tärkeitä globaaleja yksittäisten materiaalien toimittajia. Esimerkiksi Venäjä ja Etelä-Afrikka ovat suurimmat maailmanlaajuiset platinaryhmän metallien toimittajat, USA berylliumin toimittaja ja Brasilia niobiumin toimittaja.



Kuva 4. Kartta tärkeimmistä maailmanlaajuisista raaka-aineiden tuottajamaista ja raaka-aineista, jotka on luettelut EU:lle kriittisiksi vuonna 2020<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>



**Kuva 5. Kaikkien arvioitujen kriittisten raaka-aineiden tärkeimmät maailmanlaajuiset toimittajat (perustuu toimitettujen raaka-aineiden lukumäärään, keskiarvo vuosina 2012–2016)<sup>9</sup>.**

Monien raaka-aineiden osalta EU ei ole mukana arvoketjun alkuvaiheissa, sillä EU:ssa ei louhita esimerkiksi antimonia, berylliumia, vismuttia, boraatteja, molybdeeniä, niobiumia, platinametallia, harvinaisia maametalleja, tantaalia, titaania, vanadiinia tai zirkoniumia. Tämä voi johtua joko mineraaliesiintymien puuttumisesta EU:n alueella, rajallisista tiedoista materiaalien saatavuudesta EU:ssa, taloudellisista ja yhteiskunnallisista tekijöistä, jotka vaikuttavat kielteisesti etsintään (esiintymien löytämistä ja karakterisointia varten, luonnonvarat ja resurssit jne.) tai louhintaan (nykyisten kaivosten sulkeminen, haluttomuus avata uusia kaivoksia jne.). Bioottiset materiaalit, kuten luonnonkumi, sapele ja luonnontiikkipuu ovat peräisin trooppisista kasveista. Niiden tuotanto on siis kokonaan EU:n ulkopuolella. Näiden raaka-aineiden saamiseksi EU jäsenvaltioilla ei ole muuta vaihtoehtoa kuin tuoda niitä EU:n ulkopuolelta, joko jalostamattomina tai jalostettuina sisäisille markkinoille.

EU toimii harvojen raaka-aineiden suurimpana tuottajana, kuten hafniumin (Ranska), strontium (Espanja), luonnonkorkki (Portugali) ja perliitti (Kreikka) (kuva 6). Joidenkin raaka-aineiden osalta, kuten kiviainekset, maasälpä, kipsi, hafnium, indium, kaoliinisavi, kalkkikivi (korkea puhtaus), magnesiitti, luonnonkorkki, perliitti, piidioksidihiekka ja rikki, jäsenvaltiot tuottavat riittävästi, jotta tuontia EU:n ulkopuolelta on voitu vähentää. EU on riippuvainen tuonnista yli 80 prosentissa teollisuuden ja talouden tarvitsemista raaka-aineista.

<sup>9</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

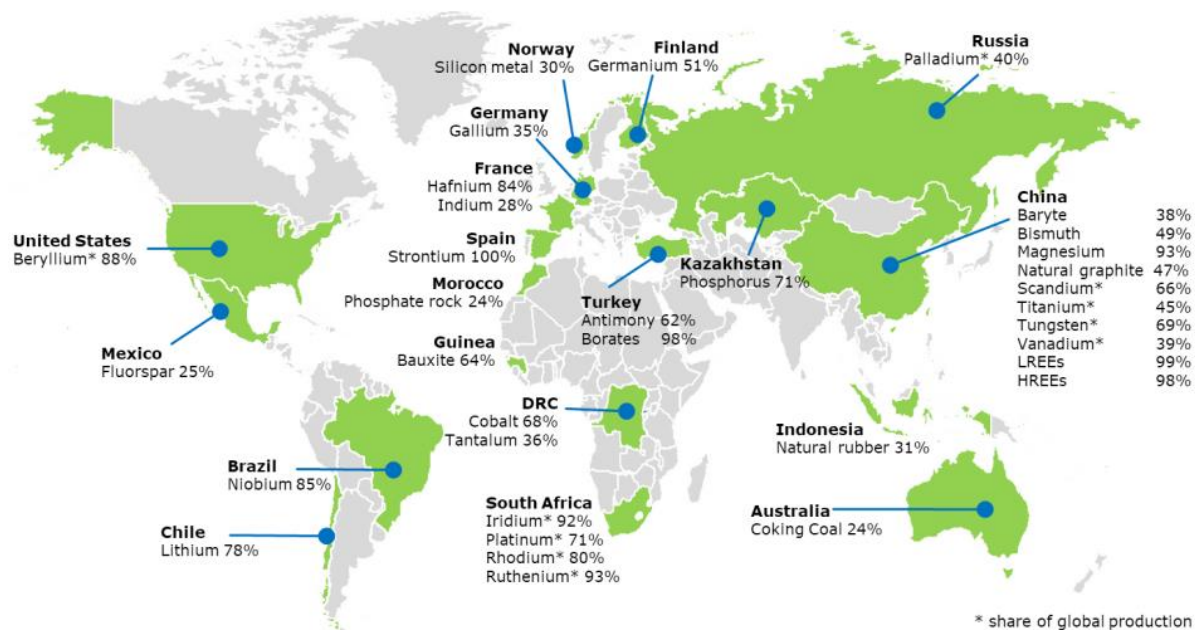


Kuva 6. EU:n kriittisten raaka-aineiden tuottajat. Suluissa osuudet maailmanlaajuisesta tarjonnasta vuosina 2012–2016<sup>10</sup>.

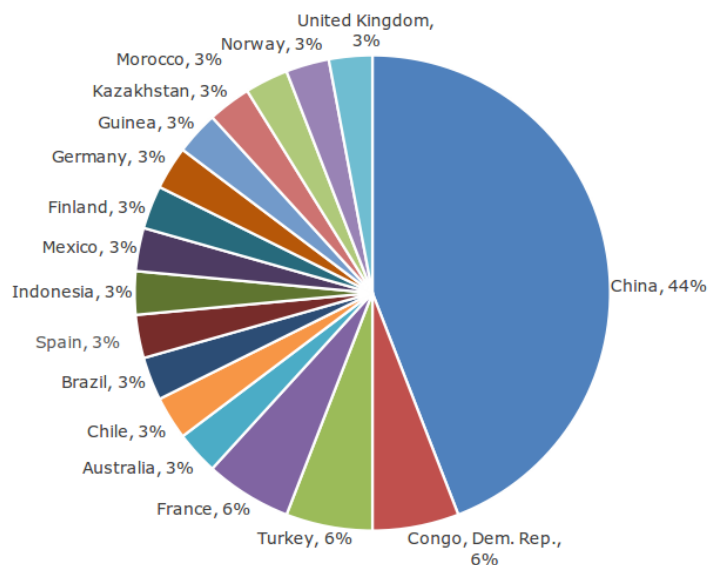
### 3.3 EU:n kriittisten raaka-aineiden hankinta

Vaikka Kiina on suurin maailmanlaajuinen toimittaja suurimmalle osalle kriittisiä raaka-aineita, EU:n ensisijaisen hankintalähteen (eli kotimaisen tuotannon ja tuonnin) analyysi antaa toisenlaisen kuvan (kuva 7, kuva 8). Vaikka Kiina on EU:n tärkein toimittaja, useat muut maat edustavat pääosuutta EU:n tiettyjen kriittisten raaka-aineiden toimituksista, kuten Brasilia (niobium), Chile (litium) ja Meksiko (fluorisälpä).

<sup>10</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>



Kuva 7. Kartta tärkeimmistä maista, joista EU hankkii kriittisiä raaka-aineita<sup>11</sup>.



Kuva 8. Tärkeimmät EU:n kriittisten raaka-aineiden hankintamaat (perustuu toimitettujen raaka-aineiden lukumäärään), keskiarvo vuosilta 2012–2016 (REE osalta 2016–2018)<sup>12</sup>.

### 3.4 Muut teollisuudelle kriittiset materiaalit

EU:ssa metallinjalostusteollisuudessa käytettyjen raaka-aineiden määrä on suurempi kuin niiden kotimainen tuotanto. Suomeenkin tuodaan suuria määriä kivennäisraaka-aineita, mm. kupari-, rauta-, nikkeli- ja sinkkimalmirikasteita. Näitä malmirikasteita tuodaan mineraalituotteista Suomeen arvoltaan<sup>13</sup> eniten.

Suurimmat vientimaat eri malmirikasteiden osalta ovat:

<sup>11</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

<sup>12</sup> Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U., et al., European Commission, Study on the EU's list of critical raw materials (2020): executive summary, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

<sup>13</sup> [Kaivannaisten ulkomaankauppa | Kaiva.fi](#)

- Kuparimalmirikaste: Chile, Peru ja Australia<sup>14</sup>
- Rautamalmirikaste: Australia, Brasilia ja Etelä-Afrikka<sup>15</sup>
- Nikkelimalmirikaste: Filippiinit, Uusi Caledonia ja Australia<sup>16</sup>
- Sinkkimalmirikaste: Australia, Peru, USA<sup>17</sup>.

Selvityksen kirjoittamisen hetkellä suomalaisille valimoille tärkeitä ja vaikeasti saatavia tai erittäin kalliita materiaaleja ovat seuraavat<sup>18</sup>:

- Raaka-aineharkot valurautojen valmistukseen, erityisesti matalan mangaanin ja/tai matalan rikki- ja fosforipitoisuuden omaavat. Venäjä on ollut iso toimittaja näille. Tällä hetkellä hankitaan spottierää kalliilla mm. Brasiliasta.
- Ferroseokset, kuten FeMo, FeSi ja FeSiMg. Myös SiC eli piikarbidi. Toimituksia normaalisti Venäjältä, Ukrainasta ja Kiinasta.
- Grafiitti erityisesti valokaarisulatusuunien elektrodit. Toimitusmaa on Kiina.

<sup>14</sup> <https://oec.world/en/profile/hs/copper-ore>

<sup>15</sup> <https://www.statista.com/statistics/300328/top-exporting-countries-of-iron-ore/>

<sup>16</sup> <https://oec.world/en/profile/hs/nickel-ores-and-concentrates>

<sup>17</sup> <https://oec.world/en/profile/hs/zinc-ores-and-concentrates>

<sup>18</sup> Valutuoteteollisuuden ry:n haastattelu

## 4. STRATEGISET SEKTORIT SEKÄ AVAINTEKNOLOGIAT

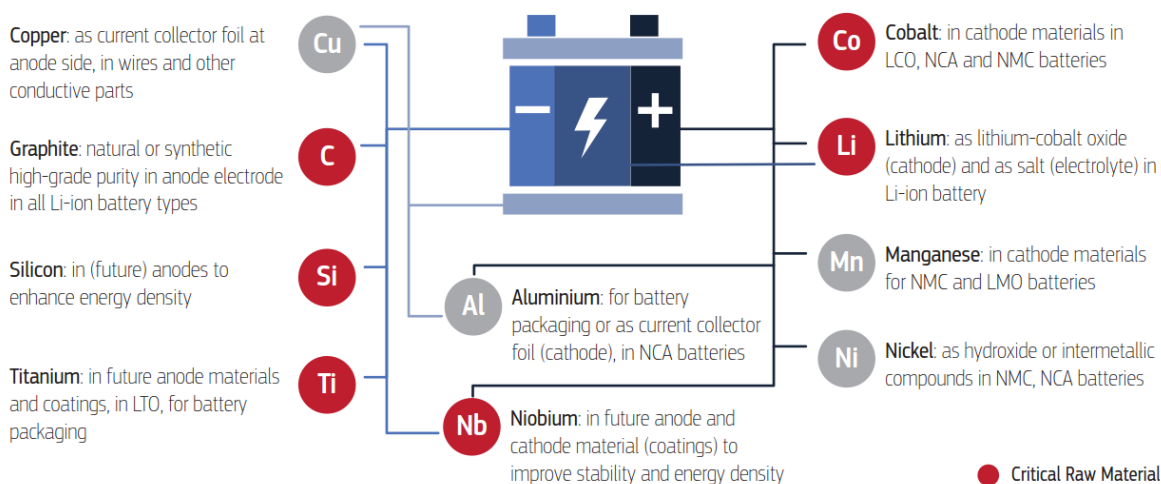
EU:n komissio on tutkinut ja on tunnistanut kriittiset metallit sekä toimitusriskit yhdeksän avainteknologian toimitusketjun osalta (litiumioniakku, polttokennot, tuulivoima, sähkömoottorit, aurinkosähkötekniikka, robotiikka, dronet, 3D-tulostus ja digitaalteknologiat). Teknologioita käytetään kolmella strategisella alalla: uusiutuva energia, sähköinen liikkuvuus, puolustus ja ilmailu<sup>19</sup>. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu eri teknologioita ja niille keskeiset metallit.

### 4.1 Avainteknologiat

#### 4.1.1 Litiumioniakut



Litiumioniakkuteknologiaa otetaan nopeasti käyttöön sekä sähköiseen liikkuvuuteen että energian varastointiin jaksoittaista sähköntuotantoa varten. Teknologia on myös yhä tärkeämpi puolustussovelluksissa. Litiumioniakkujen kriittisimmät raaka-aineet ovat koboltti, litium, niobium, titaani, pii ja grafiitti (kuva 9).



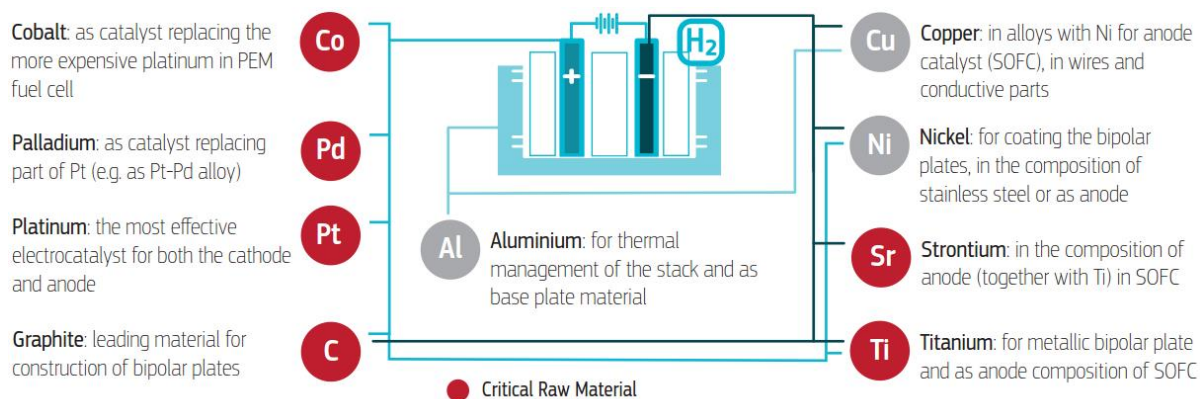
Kuva 9. Litiumioniakuissa käytetyt raaka-aineet<sup>21</sup>.

#### 4.1.2 Polttokennot



Polttokennot (FCs) ovat tärkeä energian muunnosteknologia, joka yhdessä vedyn kanssa tarjoaa suuret mahdollisuudet energijärjestelmän hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ja sähköiseen liikkuvuuteen tulevaisuudessa, vaikka laajamittaista käyttöönottoa ei ole vielä tapahtunut. Polttokennojen kriittisimmät raaka-aineet ovat koboltti, palladium, platina, grafiitti, strontium ja titaani (kuva 10).

<sup>19</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europa.eu)

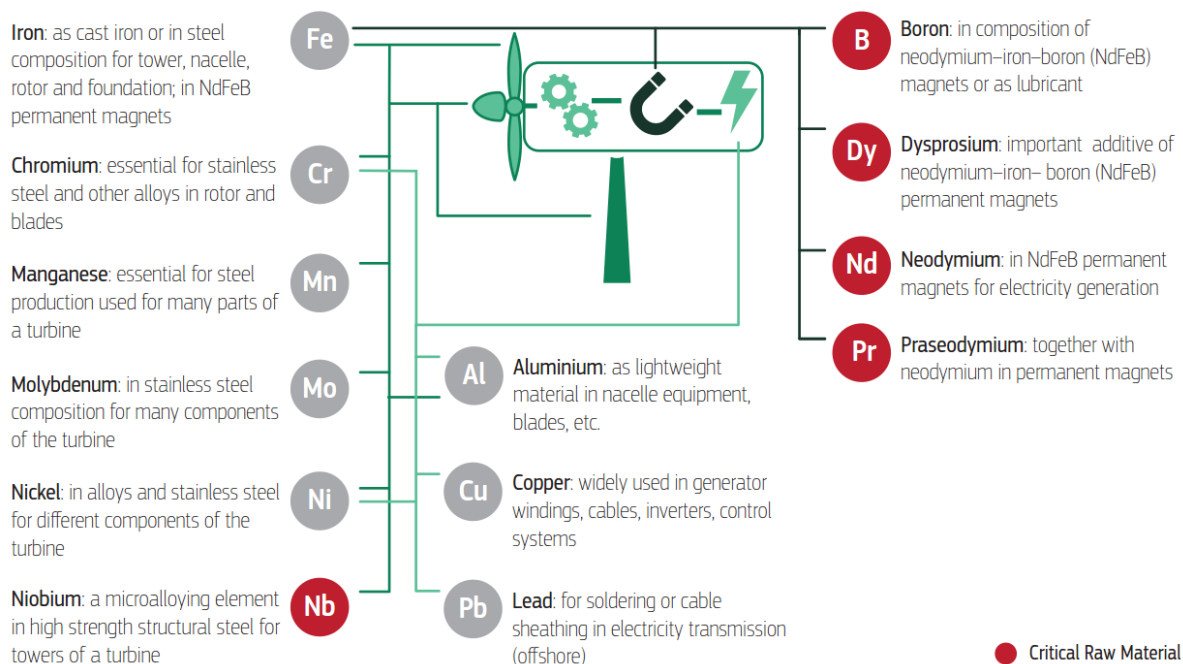


**Kuva 10. Polttokennoissa käytetyt raaka-aineet<sup>20</sup>.**

### 4.1.3 Tuulivoima



Tuulivoima on jo nyt yksi kustannustehokkaimmista uusiutuvan energian teknologioista ilmastomuutoksen hillitsemiseksi, ja se säilyy kasvavana sektorina EU:n teollisessa perustassa. Tuulivoimaloiden turbiinien käytetyimmät raaka-aineet ovat niobium, boron, dysprosium, neodymium ja praseodymium (kuva 11).



**Kuva 11. Tuulivoimaloiden turbiineissa käytetyt raaka-aineet<sup>21</sup>.**

#### 4.1.4 Sähkövetomoottorit (kestomagneetti)

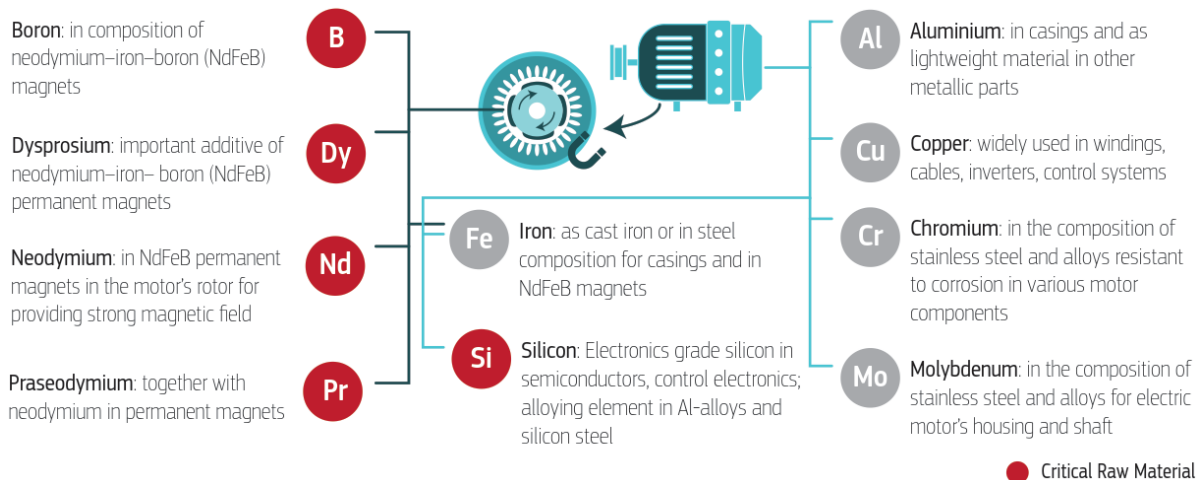
Sähkövetomoottorit ovat sähköajoneuvojen keskeisiä komponentteja. Harvinaisia maametallielementtejä sisältävät kestopagneettimoottorit ovat erityisen tehokkaita ja

<sup>20</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](#)

<sup>21</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](#)



houkuttelevia nykyisissä ja tulevaisuuden sähköisen liikkuvuuden sovelluksissa. Sähkövetomoottoreiden kriittiset raaka-aineet ovat boron, dysprosium, neodmium, praseodymium ja pii (kuva 12).

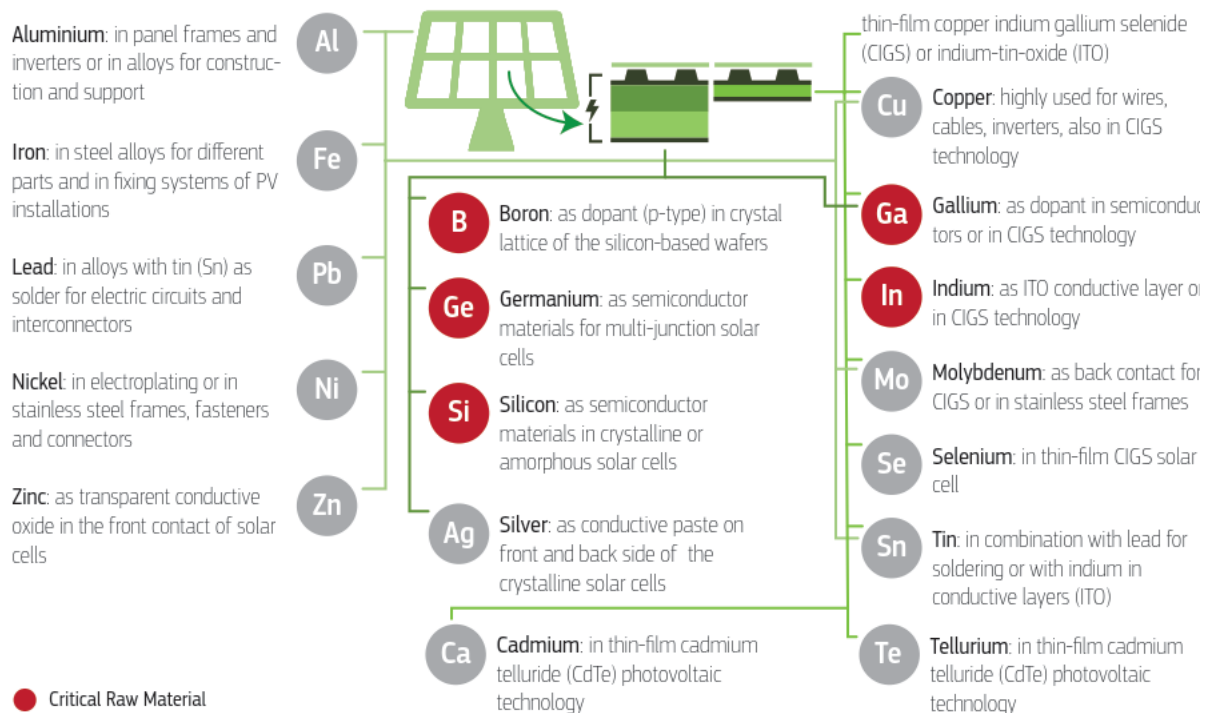


Kuva 12. Sähkövetomoottoreissa käytetyt raaka-aineet<sup>22</sup>.

#### 4.1.5 Aurinkosähköteknologia



Aurinkosähköteknologia (PV) yhdessä tuulienergian kanssa johtaa globaalin sähkösektorin muutokseen. PV-paneelit ovat tärkeitä myös avaruussovelluksissa. Aurinkosähköteknologian kriittiset raaka-aineet ovat boron, germanium, pii, gallium ja indium (kuva 13).



Kuva 13. Aurinkosähköteknologiassa käytetyt raaka-aineet<sup>23</sup>.

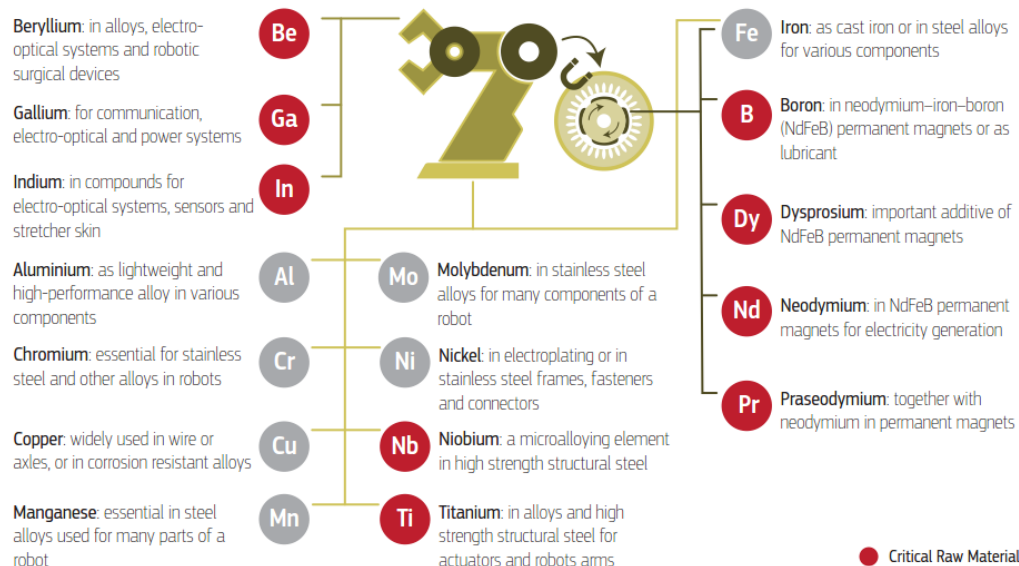
<sup>22</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europa.eu)

<sup>23</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europa.eu)

#### 4.1.6 Robotiikka



Robottiikka on nouseva teknologia, jolla on kasvava rooli tulevaisuuden valmistuksessa, mukaan lukien puolustus- ja ilmailuteollisuus, sekä energiateknologiat ja autoteollisuuden sovellukset. Robottiikan kriittiset raaka-aineet ovat beryllium, gallium, indium, boron, dysprosium, neodmium, niobium ja titaani (kuva 14).



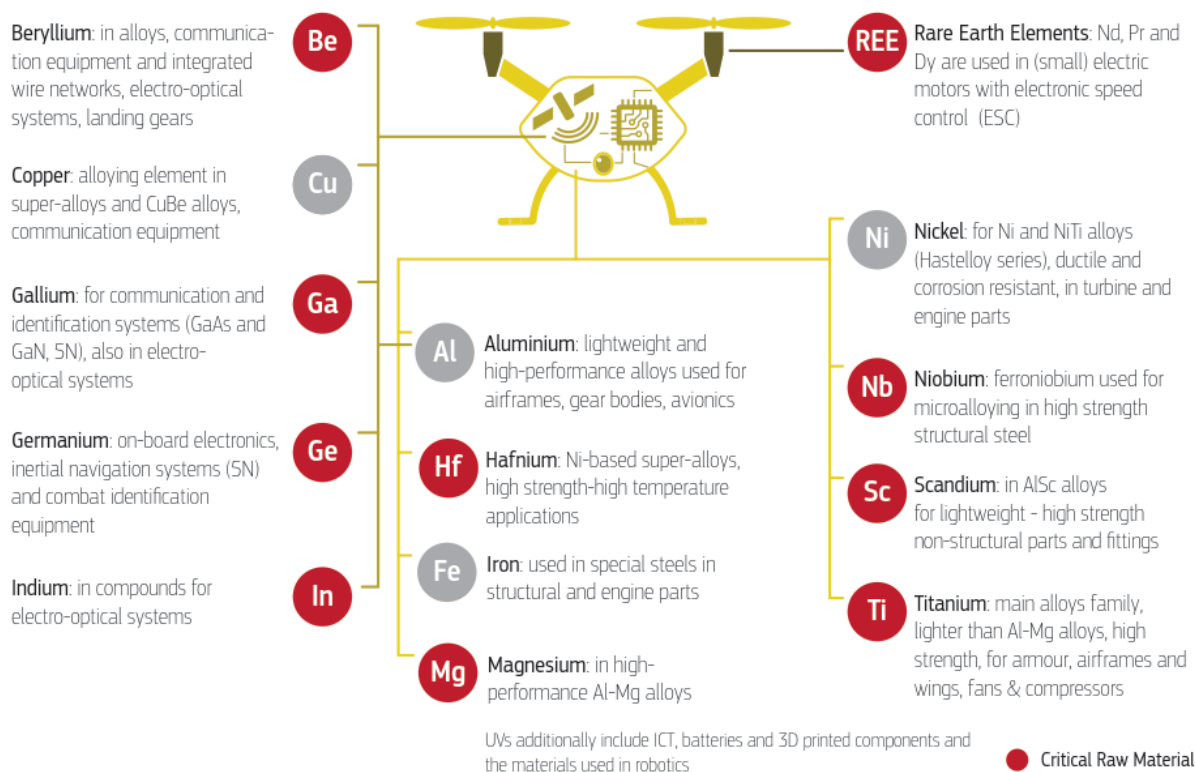
**Kuva 14. Robotiikassa käytetyt raaka-aineet<sup>24</sup>.**

#### 4.1.7 Dronet



Droneja (miehittämättömät ilma-alukset tai Unmanned Aerial vehicles eli UAV) käytetään yhä enemmän sekä siviili- että erilaisiin puolustussovelluksiin. Droneissa käytetyt kriittiset raaka-aineet ovat beryllium, gallium, germanium, indium, hafnium, magnesium, REE, niobium, scandium ja titaani (kuva 15).

<sup>24</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](#)



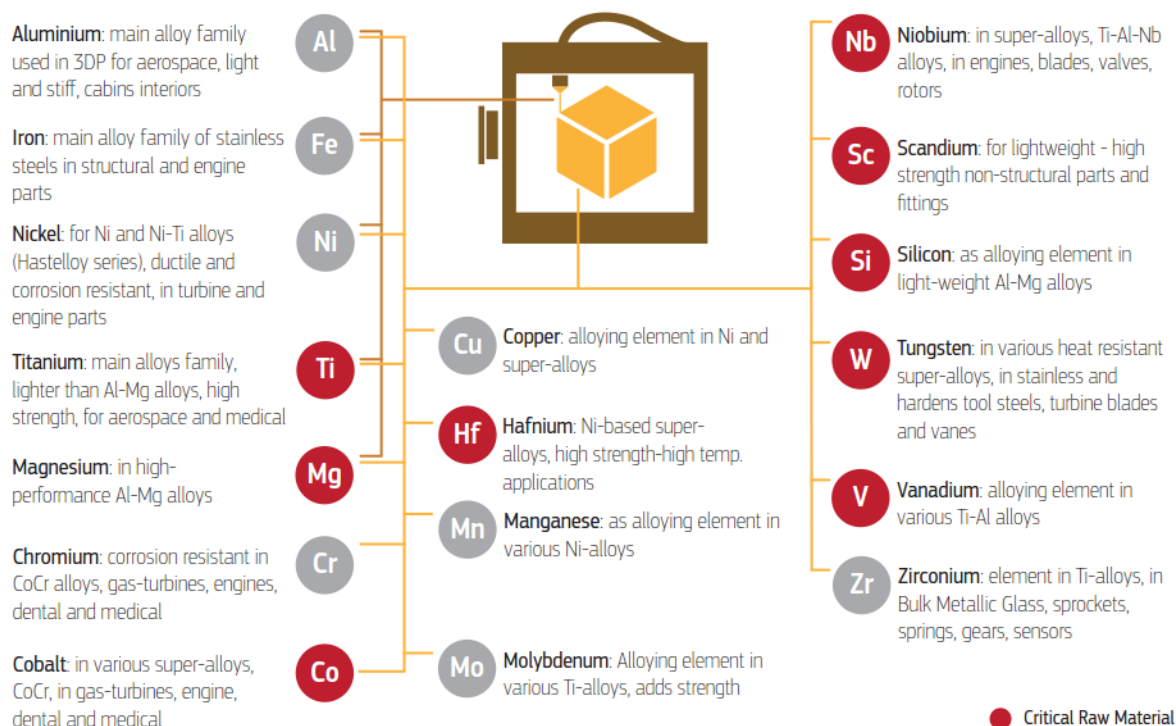
Kuva 15. Droneissa käytetyt raaka-aineet<sup>25</sup>.

#### 4.1.8 3D-tulostus



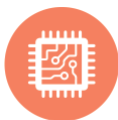
3D-tulostus (3DP, Additive manufacturing tai AM) muokkaa nopeasti perinteisiä toimitusketjuja ja korvaa perinteisen valmistuksen erityisesti puolustus- ja ilmailuteollisuudessa. Se johtaa merkittävään muutokseen kulutettujen raaka-aineiden ja jalostettujen materiaalien määrissä ja tyypeissä. 3D-tulostimien kriittiset raaka-aineet ovat titaani, magnesium, koboltti, hafnium, niobium, scandium, pii, volfram (engl. tungsten) ja vanadium (kuva 16).

<sup>25</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.eu)



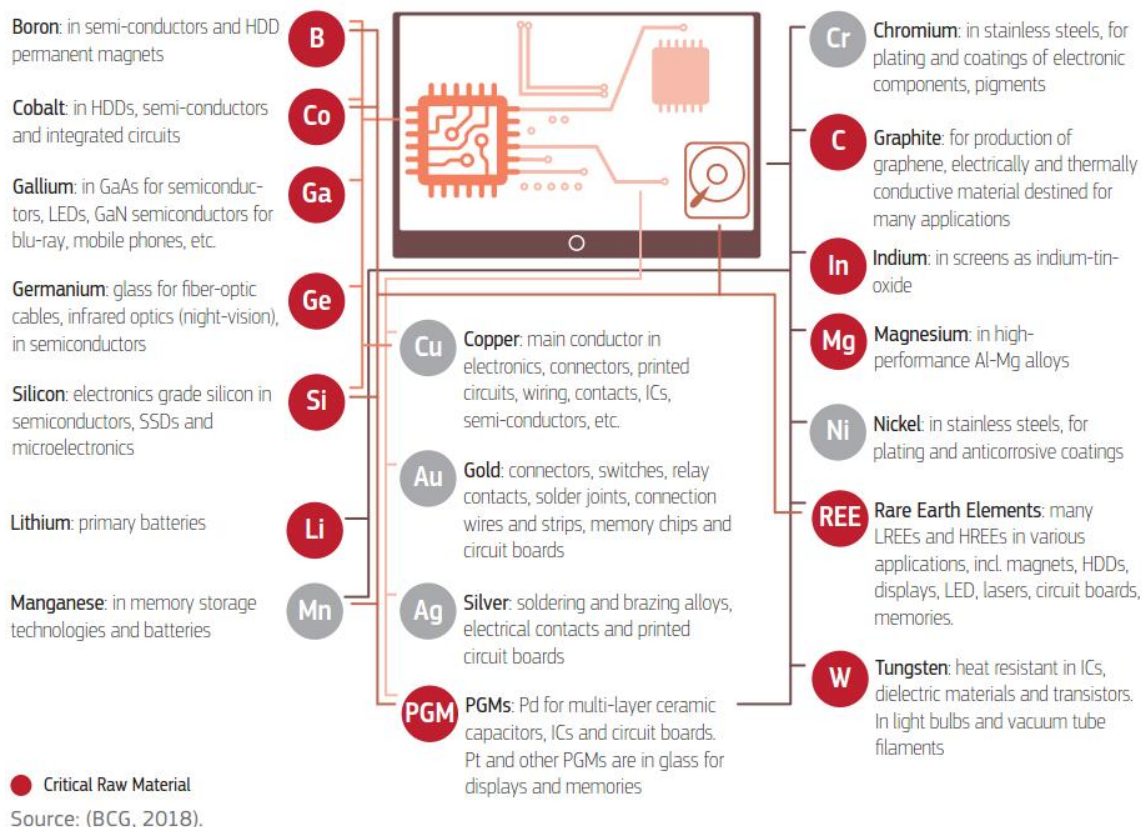
Kuva 16. 3D-tulostimiin käytetyt raaka-aineet<sup>26</sup>.

#### 4.1.9 Digitaaliset teknologiat



Digitaaliset teknologiat tukevat valtavaa digitaalista sektoria mahdollistaen kaikki tässä selvityksessä kuvatut tekniikat. Digitaalisten teknologioiden kriittiset raaka-aineet ovat boron, koboltti, gallium, pii, litium, PGM, grafiitti, indium, magnesium, REE ja volfram (engl. tungsten) (kuva 17).

<sup>26</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.eu)



Kuva 17. Digitaalisiin teknologioihin käytetyt raaka-aineet<sup>27 28</sup>.

<sup>27</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.europa.eu)

<sup>28</sup> BCG, 'Additive Manufacturing', 2018.

#### 4.1.10 Yhteenveto

Taulukoissa (2 ja 3) esitetään yhteenvetona eri materiaalien tarve kehittyvissä avainteknologioissa. Kyseisten teknologioiden kehittyminen voi muokata metallien ja metalliyhdisteiden tarpeen kehitystä.

**Taulukko 2 Kriittisten metallien tarve kehittyvissä teknologioissa**

| Kriittinen metalli | Litiumakut | Polttokeino | Tuulivoima | Sähkövetomoottorit | Aurinkosähköteknologia | Robotiikka | Dronet | 3D-tulostus | Digitaaliset teknologiat |
|--------------------|------------|-------------|------------|--------------------|------------------------|------------|--------|-------------|--------------------------|
| Cobalt (Co)        | x          | x           |            |                    |                        |            |        | x           | x                        |
| Lithium (Li)       | x          |             |            |                    |                        |            |        |             | x                        |
| Graphite (C)       | x          | x           |            |                    |                        |            |        |             | x                        |
| Silicon (Si)       | x          |             |            | x                  | x                      |            |        | x           | x                        |
| Titanium (Ti)      | x          | x           |            |                    |                        | x          | x      | x           |                          |
| Niobium (Nb)       | x          |             | x          |                    |                        | x          | x      | x           |                          |
| Platinum (Pt)      |            | x           |            |                    |                        |            |        |             | x                        |
| Palladium (Pd)     |            | x           |            |                    |                        |            |        |             | x                        |
| Strontium (Sr)     |            | x           |            |                    |                        |            |        |             |                          |
| Boron (B)          |            |             | x          | x                  | x                      | x          |        |             | x                        |
| Dysprosium (Dy)    |            |             | x          | x                  |                        | x          | x      |             | x                        |
| Neodymium (Nd)     |            |             | x          | x                  |                        | x          | x      |             | x                        |
| Praseodymium (Pr)  |            |             | x          | x                  |                        | x          | x      |             | x                        |
| Germanium (Ge)     |            |             |            |                    | x                      |            | x      |             | x                        |
| Gallium (Ga)       |            |             |            |                    | x                      | x          | x      |             | x                        |
| Indium (In)        |            |             |            |                    | x                      | x          | x      |             | x                        |
| Beryllium (Be)     |            |             |            |                    |                        | x          | x      |             |                          |
| Hafnium (Hf)       |            |             |            |                    |                        |            | x      | x           |                          |
| Magnesium (Mg)     |            |             |            |                    |                        |            | x      | x           | x                        |
| Scandium (Sc)      |            |             |            |                    |                        |            | x      | x           |                          |
| Tungsten (W)       |            |             |            |                    |                        |            |        | x           | x                        |
| Vanadium (V)       |            |             |            |                    |                        |            |        | x           |                          |

Taulukko 3 Ei-kriittisten metallien tarve kehittyvissä teknologioissa

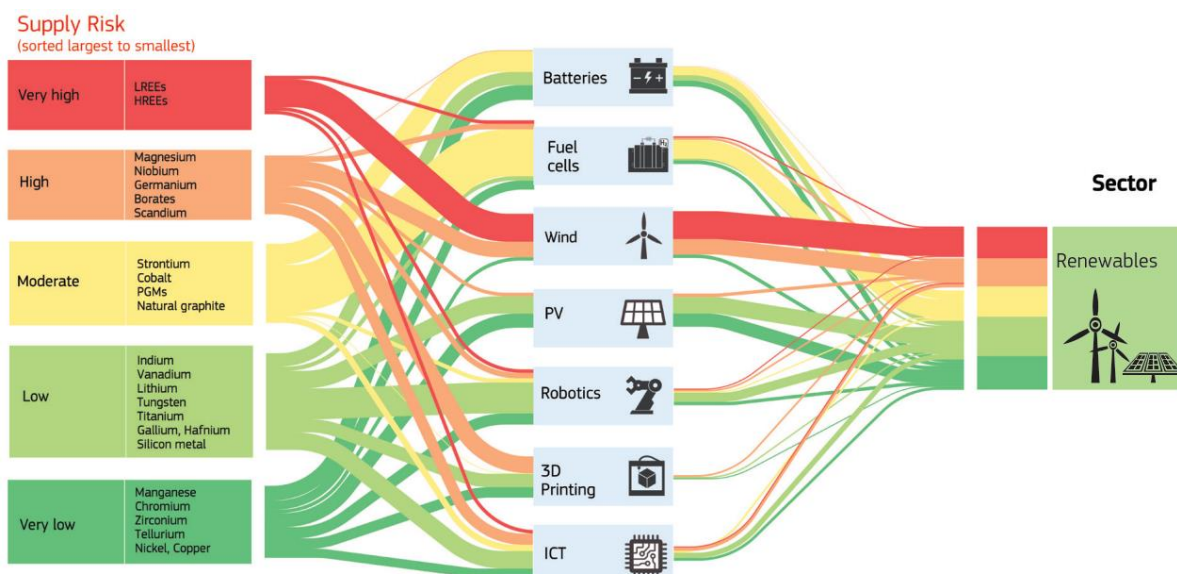
| Ei-kriittinen metalli | Litiumakut | Polttokeuhot | Tuulivoima | Sähkövetomoottorit | Aurinkosähköteknologia | Robotiikka | Dronet | 3D-tulostus | Digitaaliset teknologiat |
|-----------------------|------------|--------------|------------|--------------------|------------------------|------------|--------|-------------|--------------------------|
| Copper (Cu)           | x          | x            | x          | x                  | x                      | x          | x      | x           | x                        |
| Maganese (Mn)         | x          |              | x          |                    |                        | x          |        | x           | x                        |
| Nickel (Ni)           | x          | x            | x          |                    | x                      | x          | x      | x           |                          |
| Aluminium (Al)        |            | x            | x          | x                  | x                      | x          | x      | x           |                          |
| Lead (Pb)             |            |              | x          |                    | x                      |            |        |             |                          |
| Molybdeum (Mo)        |            |              | x          | x                  | x                      | x          |        | x           |                          |
| Iron (Fe)             |            |              | x          | x                  | x                      |            | x      | x           |                          |
| Chronium (Cr)         |            |              | x          | x                  |                        | x          |        | x           |                          |
| Zinc (Zn)             |            |              |            |                    | x                      |            |        |             |                          |
| Silver (Ag)           |            |              |            |                    | x                      |            |        |             | x                        |
| Cadmium (Ca)          |            |              |            |                    | x                      |            |        |             |                          |
| Selenium (Se)         |            |              |            |                    | x                      |            |        |             |                          |
| Tin (Sn)              |            |              |            |                    | x                      |            |        |             |                          |
| Tellurium (Te)        |            |              |            |                    | x                      |            |        |             |                          |
| Zirconium (Zr)        |            |              |            |                    |                        |            |        | x           |                          |
| Gold (Au)             |            |              |            |                    |                        |            |        |             | x                        |

## 4.2 Strategiset sektorit

### 4.2.1 Uusiutuvan energian toimiala



Useita teknologioita käytetään uusiutuvien luonnonvarojen muuntamiseen sähköksi (esim. tuuliturbiinit ja aurinkopaneelit), energian varastointiin (esim. ladattaviin akkuihin), valmistusprosessien parantamiseen (esim. robotiikan ja 3DP:n avulla) sekä sähkön muuntamisen ja siirron helpottamiseksi älykkäiden verkkojen kautta (esim. digitaalitekniikan avulla) (kuva 18). Kuvassa esitetään myös yhteenveto näiden teknologioiden kriittisille raaka-aineille sekä niiden toimitusriskien tasot.

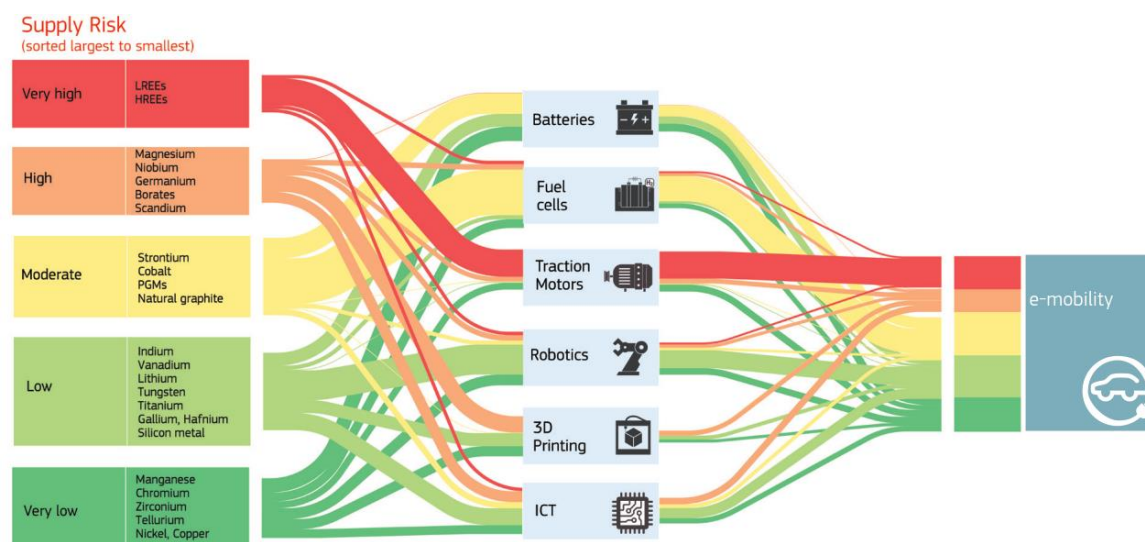


Kuva 18. Uusiutuvan energia-alaan liittyvät raaka-aineet ja toimitusriskit<sup>29</sup>.

#### 4.2.2 Sähköinen liikkuminen



Jotta siirtyminen puhtaampaan, automatisoituun, yhdistettyyn ja vähähiilisempään liikkumiseen olisi mahdollista tarvitaan laaja valikoima teknologioita: akut, polttokennot, vetomootorit ja ICT-teknologiat. Teknologiat mahdollistavat sähköisen liikkuvuuden käyttöönoton vuoteen 2050 mennessä. Samalla on odotettavissa merkittäviä muutoksia myös valmistusprosesseihin. Kehitystä ohjaavat (valmistus)robotiikan parannukset, sekä kevyiden ja vahvojen komponenttien 3D-tulostus. Molemmat kehityssuunnat saattavat muuttaa perinteistä tuotantopohjaa. Myös digitaalisilla tekniikoilla on keskeinen rooli tuotantojärjestelmien tehokkuuden lisäämisessä (kuva 19). Kuvassa esitetään myös yhteenveto näiden teknologioiden kriittisille raaka-aineille sekä niiden toimitusriskien tasot.



Kuva 19. Sähköisen liikkumisen alaan liittyvät raaka-aineet ja toimitusriskit<sup>30</sup>.

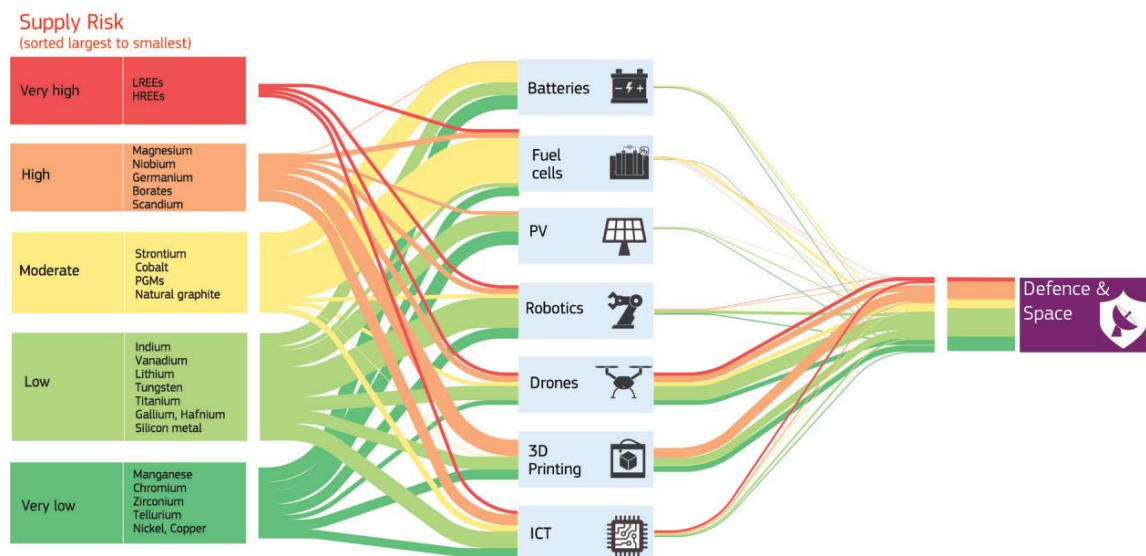
<sup>29</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.europa.eu)

<sup>30</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.europa.eu)

### 4.2.3 Puolustus ja ilmailu



Uudet teknologiat auttavat kehittämään entistä tehokkaampia puolustussovelluksia. Ainakin seuraavat teknologiat pidetään tärkeänä Euroopan puolustukselle: kehittyneet akut, FC-laitteet, aurinkosähkö, robotiikka, miehittämättömät ajoneuvot, 3DP ja ICT (kuva 20). Kuvassa esitetään myös yhteenveto näiden teknologioiden kriittisille raaka-aineille sekä niiden toimitusriskien tasot.

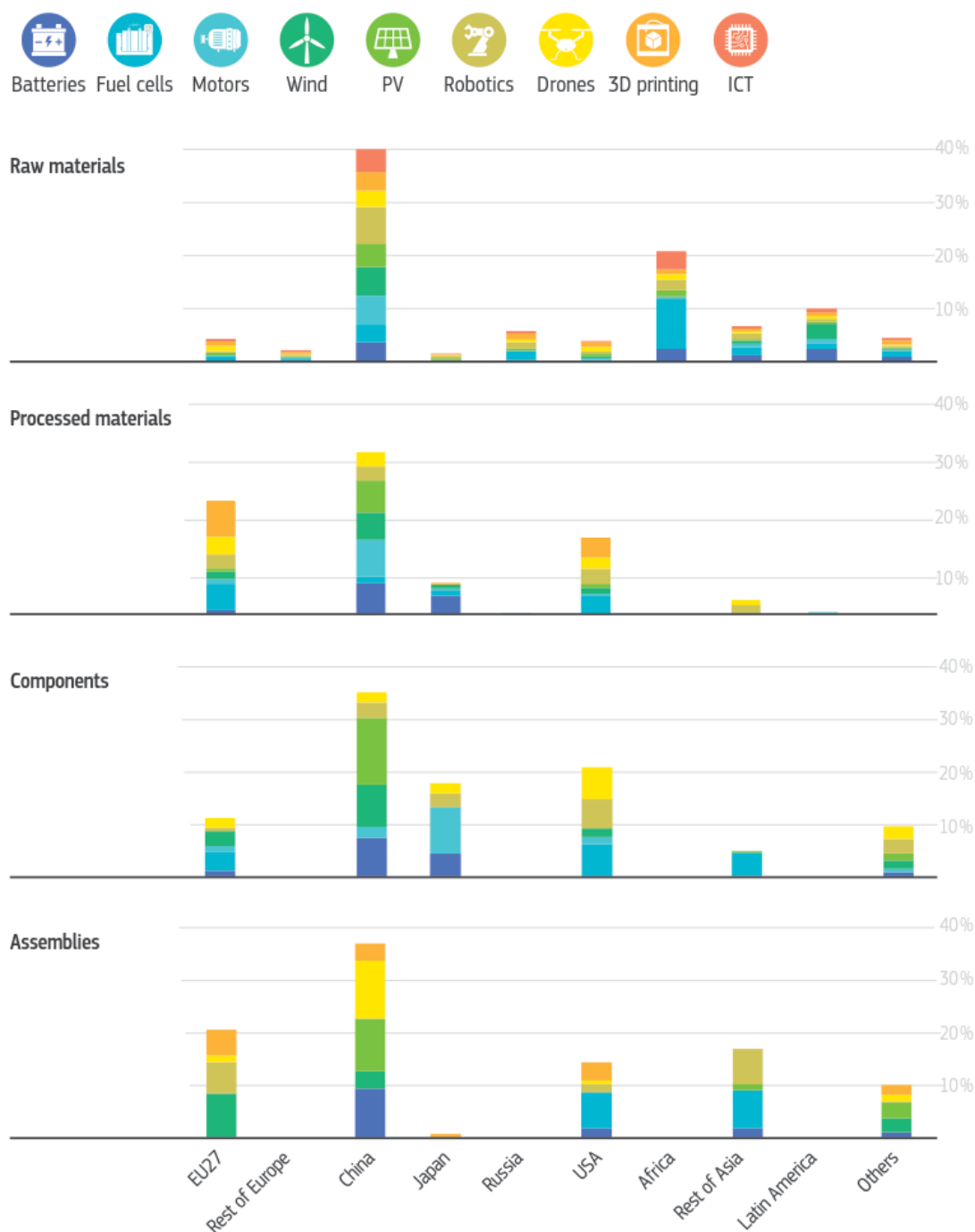


Kuva 20. Puolustus- ja avaruusalaan tarvittavat liittyvät raaka-aineet ja toimitusriskit<sup>30</sup>.

### 4.3 Arvoketjut ja toimitusriskit

Kuva 21 on esitetty raaka-ainetuotannon, jalostettujen materiaalien, komponenttien ja kokoonpanotuotannon päätoimipaikat yhdeksän yllä mainittujen teknologioiden osalta. Se osoittaa, että suurimmat huolenaiheet liittyvät raaka-ainevaiheeseen, jossa vain 3 % raaka-aineiden alkuperästä on EU-maista. Suurin osa kaivos- ja jalostustuotannosta on sijoittunut Kiinaan. Toisaalta arvoketjun myöhemmissä vaiheissa on myös korkea tuotantokeskittymä Kiinassa<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(european.eu\)](https://docsroom.europeancommission.eu)

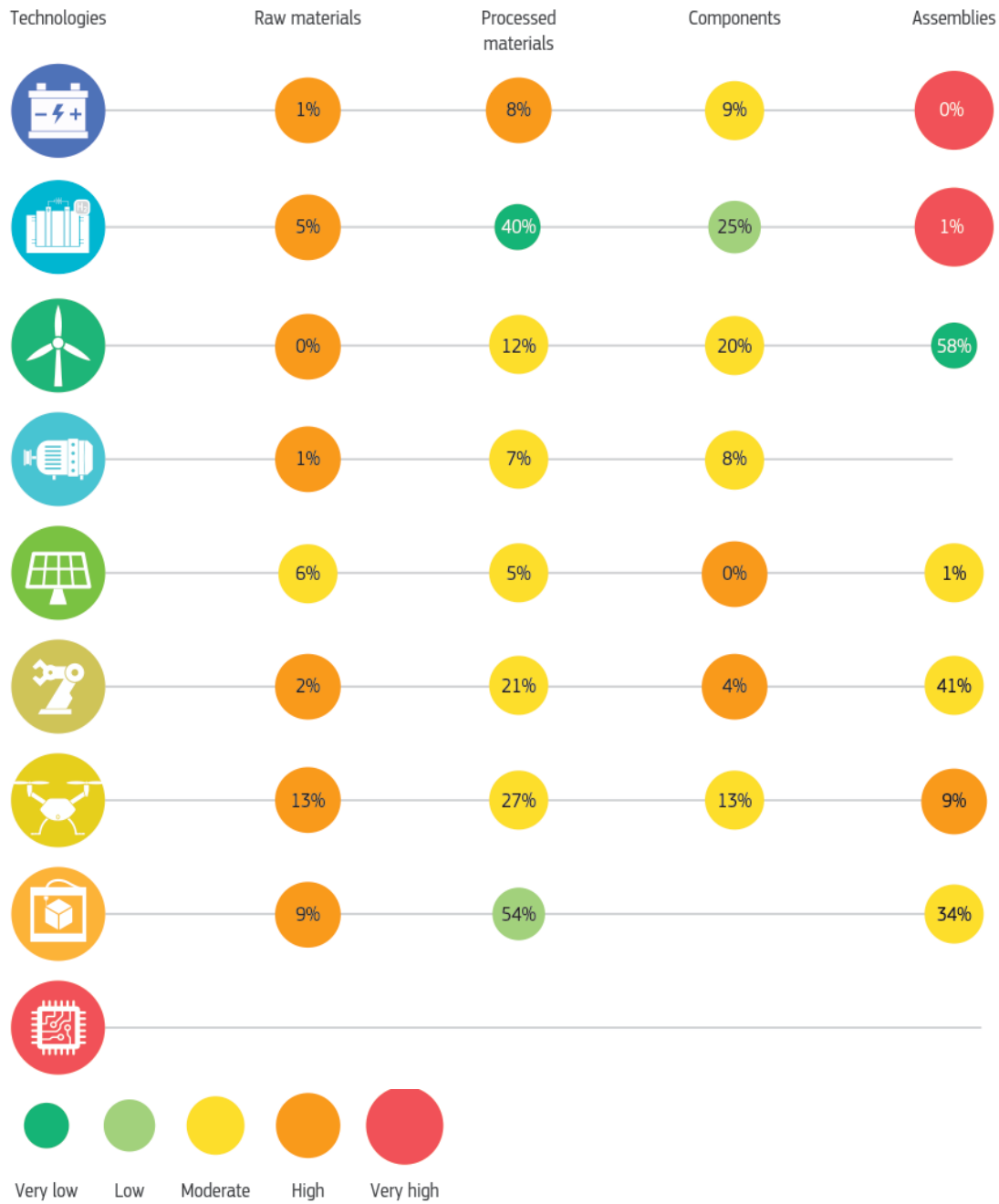


Kuva 21. Raaka-aineiden, jalostettujen materiaalien, komponenttien ja kokoonpanojen päätoimittajat maaosuuksina kahdeksan teknologian osalta (Bobba, 2020 DocsRoom )<sup>32</sup>.

*Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors* -EU-raportissa on vuonna 2020 tunnistetut toimitusriskit jalostettujen materiaalien, komponenttien ja kokoonpanojen eri vaiheissa. Tulokset on esitetty kuvassa (kuva 22) kunkin teknologian osalta lukuun ottamatta ICT:tä, jota ei analysoitu yhtä yksityiskohtaisesti<sup>33</sup>. Analyysi osoittaa, että Euroopalla on erittäin korkeat toimitusriskit akkujen ja polttokennojen kokoonpanon osalta, melko korkeat toimitusriskit raaka-aineista lähes kaikissa tarkastelluissa teknologioissa, melko korkeat toimitusriskit metallien

<sup>32</sup> Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 [DocsRoom - European Commission \(europa.eu\)](https://docsroom.europeancommission.eu/)

jalostusvaiheessa akkujen osalta ja melko korkeat toimitusriskit aurinkosähköteknologian sekä robotiikan komponenttien osalta.



Kuva 22. Tunnistettut toimitusriskit EU:lle sekä EU:n tuotanto-osuudet<sup>33</sup>.

33 Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J. (co-lead), Mathieux, F., Pavel, C. (co-lead), European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 DocsRoom - European Commission (europa.eu)

## 5. KRIITTISTEN METALLIEN TUOTANTO SUOMESSA

Suomessa on Euroopan merkittävimpiin kuuluvat litiumvarannot, kuten myös titaani, bauksiitti ja strontium. Suomen kallioperästä on löydetty lukuisia mineraaliesiintymiä, joissa jokin pääarvoaineista on EU:lle kriittinen raaka-aine, ja kaikkiaan 14 eri kriittistä raaka-ainetta esiintyy pääarvoaineena Suomen mineraaliesiintymissä. Tällä hetkellä Suomessa tuotetaan kriittisten raaka-aineiden osalta kobolttia, platinaryhmän metalleja ja fosfaattikiveä<sup>34</sup>.

### Koboltti

Suomi on ainoa EU-maa, jonka kaivoksista tuotetaan kobolttia. Vuonna 2020 kobolttia tuotettiin Sotkamon, Kevitsan ja Kylylahden kaivoksissa yhteensä 1 559 tonnia<sup>33</sup>.

Kylylahden tuotanto loppui vuonna 2020 kaivoksen sulkemisen vuoksi. Kylylahden kaivoksesta tuotetun koboltin jalostaminen saattaa kuitenkin jatkua tulevaisuudessa, sillä käynnissä olevassa tutkimusprojektissa selvitetään, pystyisikö aiemmin tuotetuista hyödyntämättömistä raaka-aineista erottamaan taloudellisesti kobolttia ja nikkeliä<sup>33</sup>.

Terrafamen Sotkamon kaivoksesta tuotettavasta nikkeli-kobolttisulfidista valtaosa on aiemmin jalostettu muualla, pääosin Aasiassa, sähköautojen akuissa käytettäväksi nikkelisulfaattiksi ja kobolttisulfaattiksi. Vuoden 2021 kesästä lähtien jalostusprosessi on tehty Sotkamon kaivoksen tuntumassa sijaitsevassa Terrafamen omassa akkukemikaalitehtaassa, joka tuottaa sivutuotteena myös ammoniumsulfaattia. Tavoitteena on vuodesta 2024 lähtien tuottaa vuosittain 170 000 tonnia nikkelisulfaattia ja 7 400 tonnia kobolttisulfaattia. Kyseinen nikkelisulfaatin määrä riittää miljoonan ja kobolttisulfaatin määrä 300 000 uuden sähköauton akun valmistamiseen<sup>35</sup>.

### Jalometallit

Vuonna 2020 platinaa tuotettiin 1 277 kg ja palladiumia 858 kg, molempia Kevitsan kaivoksessa. Tähänastisen tuotannon huippu osui vuoteen 2018, jonka jälkeen tuotantomäärät laskivat selvästi vuonna 2019, mutta palasivat kohti aiempia lukemia vuonna 2020. Suomi on ylivoimaisesti suurin platinan ja palladiumin tuottaja EU maiden joukossa. Vuonna 2020 kultaa tuotettiin Suomen kaivoksista 8 668 kg. Myös kullan tuotanto kasvoi vuoden 2019 laskun jälkeen. Kullasta 75 % tuli Kittilän kaivoksesta, jossa tehtiin uusi tuotantoennätys vuonna 2020: 6 473 kg. Edellinen ennätys oli 6 299 kg vuodelta 2016. EU maista kullan kaivostuotanto on korkeinta Suomessa ja Bulgariassa. Vuonna 2020 hopean kotimainen kaivostuotanto oli 54,8 tonnia. Sen tuotanto kasvoi 36 % edellisvuodesta, jolloin hopean tuotanto käynnistyi Sotkamo Silver Oy:n Hopeakaivoksessa moninkertaistaen hopean kotimaisen kaivostuotannon. Puola, Ruotsi, Espanja ja Portugali ovat EU:n suurimpia hopeantuottajia, ja Suomi on liittymässä tähän joukkoon: vuonna 2019 Puola tuotti hopeaa 1 455 tonnia, Ruotsi 420 tonnia, Espanja 78 tonnia ja Portugali 53 tonnia<sup>36</sup>.

### Akkujen arvoketju

Kansainvälisen energiajärjestö IEA:n mukaan sähköautojen valmistus on ollut globaalisti nopeassa kasvussa viimeisen kymmenen vuoden aikana. Vaikka sähköautojen määrä on vielä vaatimaton, liikenne on maailmanlaajuisesti suuressa murroksessa, ja sähköautoistumista koskevat ennusteet näyttävät lupaavilta. Kuluttajat ovat yhä laajemmin kiinnostuneita hankkimaan sähköauton. Tähän ovat vaikuttaneet erityisesti teknologian huomattava kehittyminen, sekä sähköautomallien yhä

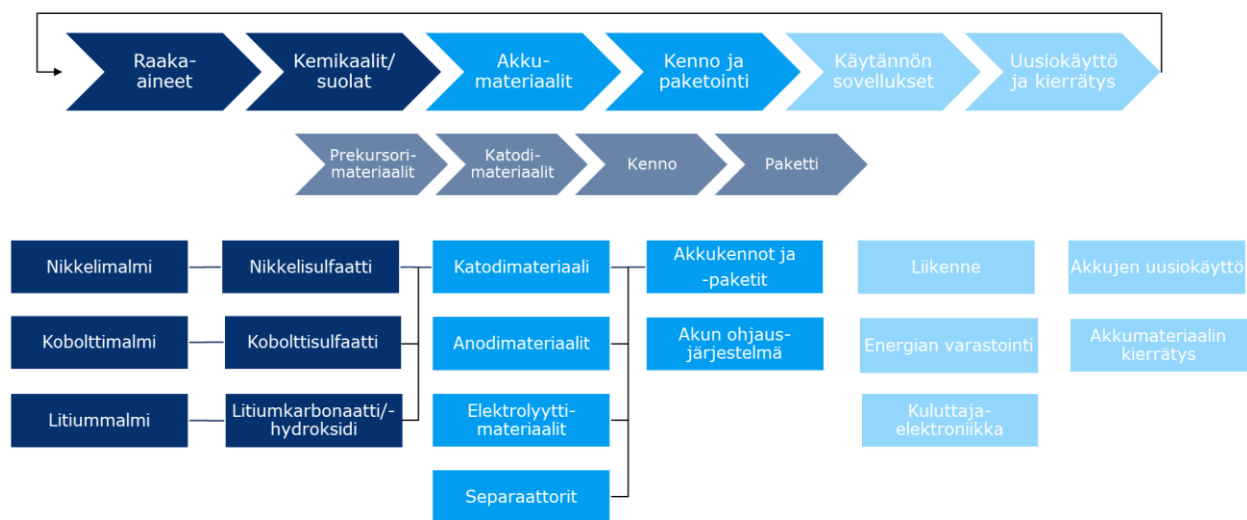
<sup>34</sup> [Kaivusteollisuuden toimialaraportti 2021 \(valtioneuvosto.fi\)](https://www.valtioneuvosto.fi/kaivosteollisuuden-toimialaraportti-2021)

<sup>35</sup> Terrafame 2020. Sustainable development! Terrafame Sustainability Review. 64 s. Saatavissa: <https://www.terrafame.com/news-from-the-mine/news/2020/06/terrafamessustainability-review-published.html>

<sup>36</sup> Brown, T.J., Idoine, N.E., Wrighton, C.E., Raycraft, E.R., Hobbs, S.F., Shaw, R.A., Everett, P., Deady, E.A. and Kresse, C. 2021. World Mineral Production 2015-2019. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, 89 s. [https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/world\\_statistics/2010s/WMP\\_2015\\_2019.pdf](https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/world_statistics/2010s/WMP_2015_2019.pdf)

parempi saatavuus. Käytännössä kaikki maailman merkittävimmät autovalmistajat ovat sitoutuneet sähköautojen valmistukseen<sup>37</sup>.

Suurin osa akkuihin liittyvästä teollisuudesta on tähän saakka ollut Aasiassa, erityisesti Kiinassa. EU:n osuus maailman akkujen raaka-aineiden tuotannosta on vain n. 1 % (2020). Samaan aikaan Euroopassa li-ion-akkujen tuotantoa ollaan ajamassa voimakkaasti ylöspäin ja sen arvellaan kattavan jopa 25 % globaalista tuotannosta vuonna 2025. Euroopan komissio on jo aiemmin tunnistanut tilanteen ja käynnistänyt toimenpiteet akkuarvoketjun kehittämiseksi. Sähköautojen litiumioniakkujen arvoketju on esitetty kuvassa 23.



**Kuva 23. Sähköautojen litiumioniakkujen arvoketju on pitkä, ja se ulottuu raaka-aineista akkujen ja niiden materiaalien uusiokäyttöön ja kierrätykseen saakka<sup>38</sup>**

Euroopan komission mukaan akut ja energian varastointi ovat hyvä esimerkki alasta, jolla voimme yhdistää ympäristönäkökohdat ja kilpailukyvyyn kehittämisen, sekä luoda kestäväää kasvua ja uusia työpaikkoja. Suomen kansallinen akkustrategia valmistui tammikuussa 2021<sup>39</sup>. Suomen kansallinen akkustrategia kytkeytyy tiiviisti Euroopan unionin akkustrategiaan. Euroopan unionin akkustrategian tavoitteena on luoda innovatiivinen, kilpailukykyinen ja kestävä akkuteollisuus Eurooppaan ja näin osaltaan hillitä ilmastomuutosta. Kansallisen akkustrategian keskeisen viestin voi kiteyttää kolmeen kokonaisuuteen: osaaminen, vastuullisuus ja kilpailukyky. Suomen tavoitteena on nousta johtavaksi akkualan maaksi akkumateriaaleja jalostamalla.

Suomi onkin yksi merkittävimmistä eurooppalaisista kaivosmaista. Kuvissa 24, 25 ja 26 on kuvaus eri metallien tuotannosta, potentiaalista, esiintyvyydestä sekä akkuminaeralikaivoksista ja -prosessointilaitoksista Suomessa.

<sup>37</sup> [https://www.scribd.com/document/493120098/Market-monitor-European-passenger-car-registrations-January-December-2020#from\\_embed](https://www.scribd.com/document/493120098/Market-monitor-European-passenger-car-registrations-January-December-2020#from_embed)

<sup>38</sup> Suomen malmijalostus Oy. Suomi ja akkutuotanto; Suomi ja akkutuotanto - Suomen Malmijalostus Oy ([www.mineralsgroup.fi](http://www.mineralsgroup.fi))

<sup>39</sup> Työ- ja elinkeinoministeriö, Kansallinen akkustrategia 2025

[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162684/TEM\\_2021\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162684/TEM_2021_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

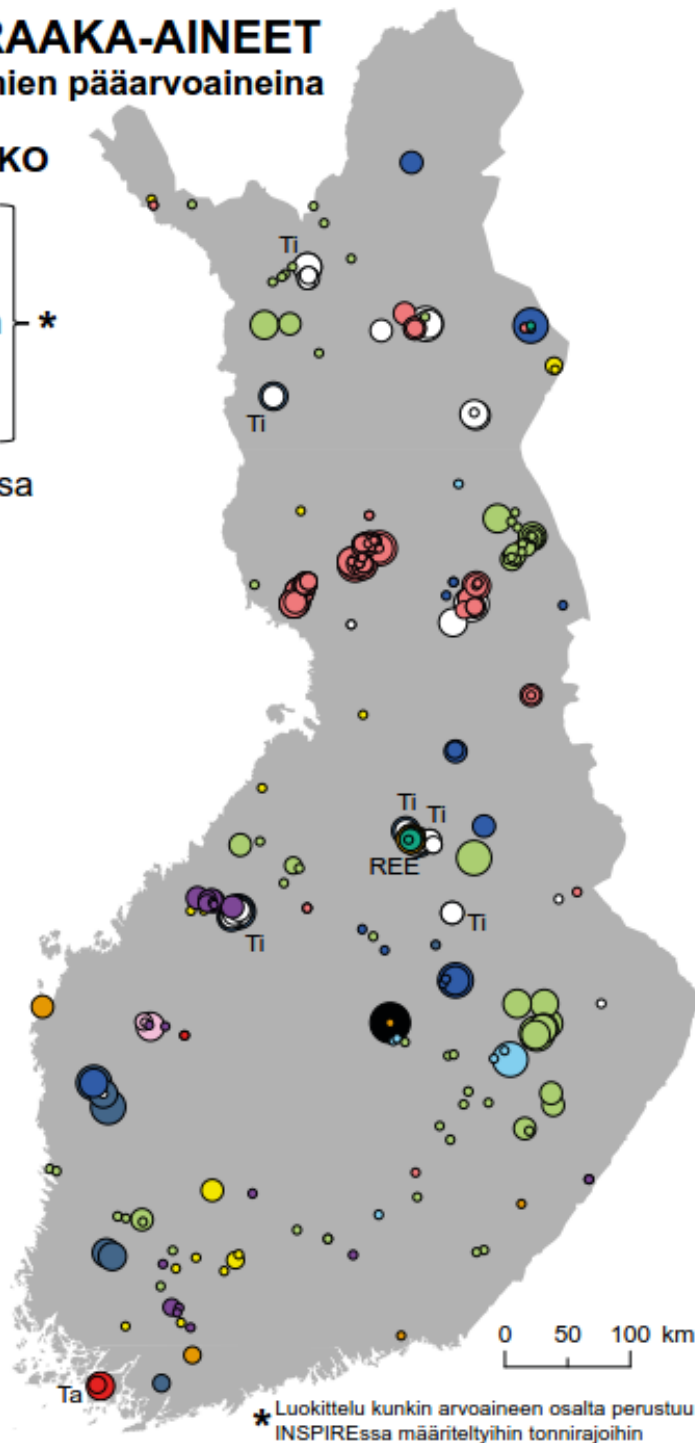
## KRIITTISET RAAKA-AINEET mineraaliesiintymien pääarvoaineina

### ESIINTYMÄN KOKO

- Hyvin suuri
- Suuri
- Keskikokoinen
- Pieni
- Hyvin pieni
- Koko ei tiedossa

### ARVOAINE

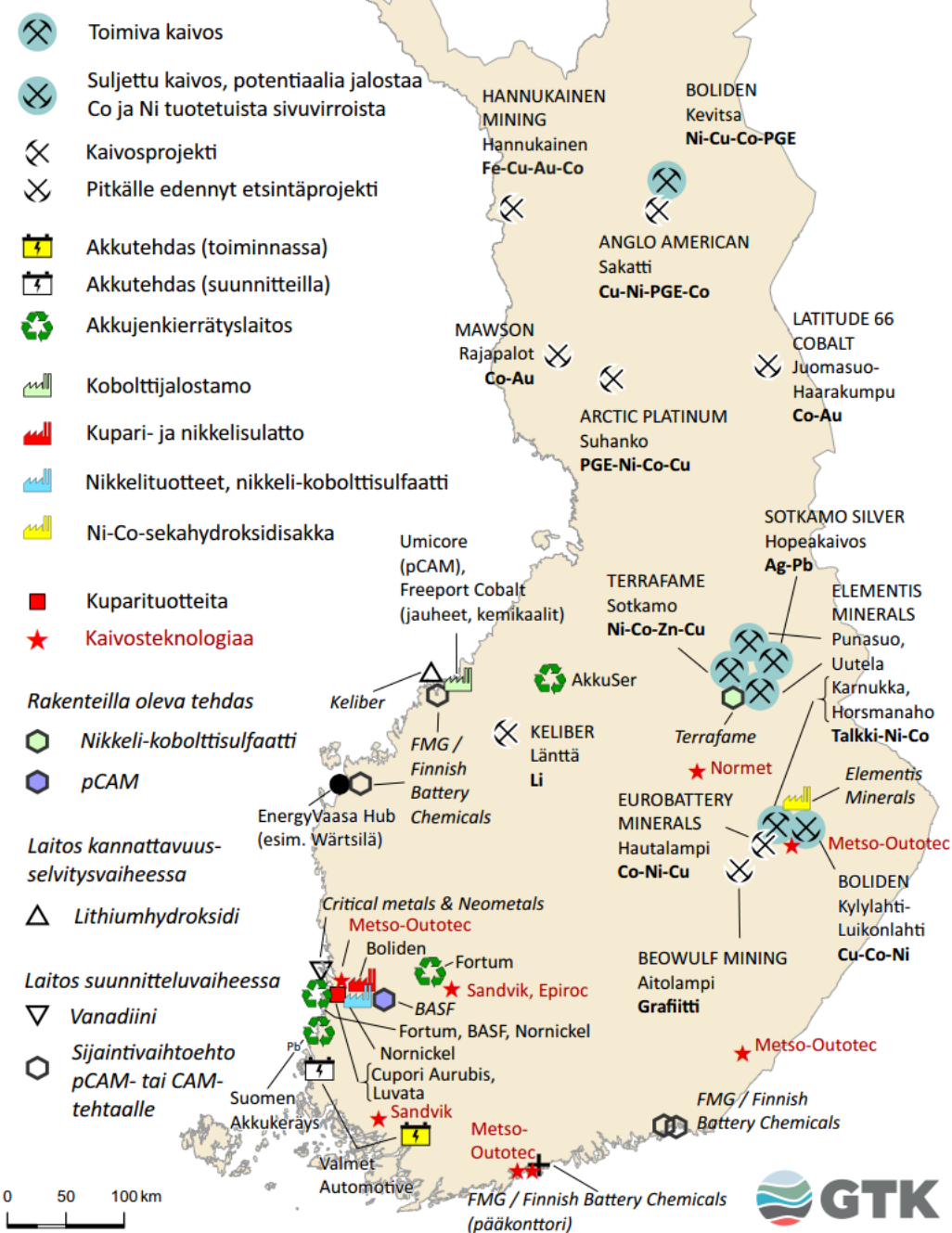
- Antimoni
- Beryllium
- Fosfaattikivi
- Grafiitti
- Koboltti
- Litium
- Niobium
- PGM
- REE
- Skandium
- Tantaali
- Titaani
- Vanadiini
- Volframi



Kuva 24. Mineraaliesiintymät, joissa jokin pääarvoaineista on EU:lle kriittinen raaka-aine. Esiintymien kokoluokittelun tonnirajat vaihtelevat arvoaineittain. Lyhenne REE ja kemialliset merkit Ta ja Ti ilmaisevat toisten symbolien alle piiloon jääviä esiintymiä (Ta = tantaali, Ti = titaani)<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> [Kaivosteollisuuden toimialaraportti 2021 \(valtioneuvosto.fi\)](#)

## AKKUMINERAALIKAIVOKSET JA -PROSESSOINTILAITOKSET



Kuva 25. Suomen akkumineraalikaivokset ja -prosessointilaitokset<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Geologian tutkimuslaitos (GTK), [Akkumineraalikaivokset ja -prosessointilaitokset \(2021\) \(gtk.fi\)](https://www.gtk.fi/)

|                                                                                   |              |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|  | TUOTANTOA    | <b>Koboltti</b><br>Suomi on ainut EU-maa, jossa kobolttia tuotetaan.                                                                                                                                          | <b>Nikkeli</b><br>Suomi on EU:n selvästi suurin nikkelin tuottaja (68 %, 2019).                                                                                                                                                   | <b>Kupari</b><br>Osuus EU:n kokonaistuotannosta n. 4 % (2019). |
|                                                                                   |              | Mineraalivarantojen puitteissa tuotannon laajentamisen varaa on. Lukuisia kaivosprojekteja onkin vireillä.                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                |
|  | POTENTIAALIA | <b>Litium</b><br>Huomattavia varantoja erityisesti Pohjanmaalla. Varantojen hyödyntämistä selvitetään parhaillaan. Tavoitteena on Euroopan suurin litiumkaivos.                                               | <b>Grafiitti</b><br>Yleinen maaperässä, mutta taloudellisesti kannattavat esiintymät harvinaisia. Beowulf Mining selvittää hyödyntämistä. Sellutuotannon sivutuotteesta ligniinistä kehitetään anodihiiltä korvaamaan grafiittia. |                                                                |
|                                                                                   |              | <b>Alumiini</b><br>Esiintymiä ei Suomessa ole löydetty.                                                                                                                                                       | <b>Mangaani</b><br>Suomen maaperässä kohtalaisesti, mutta ei aktiivisia kaivosprojekteja sen hyödyntämiseksi toistaiseksi.                                                                                                        |                                                                |
|  | HILJAISTA    |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                |
|  | PLUS         | Akkumateriaalien kiertotaloudella on korkeat tavoitteet "tuottaa" <b>kaikkia akkumateriaaleja</b> . Riippuvaisuutta neitseellisistä raaka-aineista pyritään vähentämään lisäämällä merkittävästi kierrätystä. |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                |

Kuva 26. Yhteenveto eri akkujen raaka-aineiden tuotannosta ja potentiaalista Suomessa EU:n mittakaavassa<sup>42</sup>.

<sup>42</sup> 2021\_Q3 Sähköinen liikenne tilannekatsaus 2021 10 26 jaettava (teknologiateollisuus.fi).

## 6. RAAKA-AINEHANKINTOJEN RISKIENHALLINTASTRATEGIAT YRITYKSISSÄ

Saksan German Mineral Resources Agency (DERA) ja PricewaterhouseCoopers tekemässä tutkimuksessa analysoidaan <sup>43</sup>, kuinka Saksan ulkopuoliset yritykset turvaavat raaka-ainetoimituksensa, mitä strategioita yritykset käyttävät tällä hetkellä ja aikovat käyttää tulevaisuudessa, sekä mitä mahdollisuuksia ja haasteita näihin strategioihin liittyy. Tutkimuksessa tunnistettiin 11 raaka-ainestrategiaa, jotka perustuivat kyselyyn ja haastatteluihin kone-, laitossuunnittelu-, auto- ja televiestintäteollisuuden yrityksiltä seitsemästä eri teollisuusmaasta (Japanista, Etelä-Koreasta, Kanadasta, Yhdysvalloista, Ranskasta, Italiasta ja Isosta-Britanniasta):

- Hyödykkeiden hintasuojaus
- Raaka-aineiden kohonneiden hintojen siirtäminen eteenpäin asiakkaalle
- Varastointi
- Toimittajien monipuolistaminen
- Pitkäaikaiset sopimukset
- Muutamista yrityksistä muodostuvat ostoryhmät
- Materiaalien käytön tehostaminen
- Kierrätys
- Materiaalin korvaus
- Pystysuuntainen integrointi
- IT ratkaisut päätöksenteossa

### Hyödykkeiden hintasuojaus

Yritykset voivat suojautua hyödykkeiden hintariskiltä käyttämällä laajaa valikoimaa eri rahoitusinstrumentteja esimerkiksi futuurit, optiot ja vaihtosopimukset. Tämän strategia on joustava ja mahdollistaa yritysten luotettavamman toiminnan suunnittelun. Hyödykkeiden hintasuojauksen onnistuneen käytön päähaasteet ovat asiantuntemuksen puute, sekä sopivien suojaustuotteiden puute joillekin hyödykkeille. Onnistunut toteutus edellyttää tarvittavan tietotaidon, tehokkaan sisäisen organisaation ja organisaation eri osastojen välisen yhteistyön takaamisen. Strategia tulee suunnitella yritystasolla ja yhdistää kaikkiin hankintoihin. On suositeltavaa käyttää useiden eri osastojen asiantuntijoista koostuvaa monitieteistä tiimiä parhaiden suojausasemien määrittämiseen. Myös hintojen ennustamiseen ja tulevaisuuden raaka-ainetarpeiden selvittämiseen kannattaa tehdä kattava markkinatutkimus ja käyttää liiketoiminta-analytiikan työkaluja.

### Raaka-aineiden kohonneiden hintojen siirtäminen eteenpäin asiakkaalle

Raaka-aineiden kohonneiden hintojen siirtäminen asiakkaille (tunnetaan myös hintojen läpikulkuna) antaa yrityksille mahdollisuuden pienentää hintariskiä lyhyellä aikavälillä, koska se voidaan toteuttaa nopeasti. Hintojen läpikulku on joustava strategia yrityksen voittomarginaalien suojaamiseen ja tappioiden estämiseen. Korkea kilpailu myyntimarkkinoilla ja sen aiheuttama hintapaine ovat suurimmat haasteet hintojen siirtämisessä. Onnistunut hintojen läpivienti edellyttää yksityiskohtaista myyntimarkkinoiden analysointia ja läpinäkyvää viestintää asiakkaiden kanssa. Onkin suositeltavaa käyttää analyttisiä liiketoiminnan työkaluja markkinoiden hintakehityksen ja hintaherkyyden havainnointiin ja ennustamiseen, jotta voidaan paremmin ennustaa kilpailijoiden ja asiakkaiden reagointi hinnankorotuksiin. Mikäli korotetut hinnat halutaan välittää asiakkaalle, on syytä kertoa asiakkaalle selkeästi syyt kohonneiden myyntihintojen taustalla. Tämän pitäisi lisätä hyväksyntää asiakkaiden keskuudessa. Yleisesti ottaen nopeita hinnankorotuksia tulisi välttää, jotta yritys ei menettäisi markkinaosuuksia kilpailijoille.

<sup>43</sup> German Mineral Resources Agency (DERA) and PricewaterhouseCoopers, Köster, H, et al. 2022 Securing raw material supply: Benchmarking of measures of foreign manufacturing companies and recommendations for action. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-52.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-52.pdf?__blob=publicationFile&v=6)

## Varastointi

Varastoinnin avulla yritykset voivat selviytyä toimitusketjun lyhyen ja keskipitkän aikavälin pullonkauloista ja hallita paremmin markkinoiden turbulenssia tai raaka-ainepulaa. Tämä mahdollistaa tuotannon jatkumisen, vaikka raaka-ainemarkkinoilla tapahtuisi odottamattomia kehityssuuntia. Kasvaneet raaka-ainevarastot mahdollistavat myös nopeamman reagoinnin asiakkaiden toiveisiin, mikä nopeuttaa tilauksesta maksuun -kiertoa. Haittapuolena ovat lisääntyneet varastointikustannukset ja varastoon liittyvä sitoutunut pääoma sekä riski jäädä suurien raaka-ainemäärien varaan. Strategian menestyksessä soveltaminen edellyttää, että yritykset pystyvät suunnittelemaan raaka-ainetarpeensa luotettavasti. Yritysten on hyvä analysoida perusteellisesti asiakkaitaan, tuotteidensa kysyntää ja tarvittavia raaka-aineita. Kehittyneen toiminnanohjausjärjestelmän (ERP) avulla (mukaan lukien liiketoiminta-analytiikkatyökalut) tulisi siksi tuottaa luotettavia kysyntäennusteita ja seurata keskeisiä suorituskykyindikaattoreita (KPI). Toinen mahdollinen vaihtoehto on lisätä jalostamattomien raaka-aineiden varastointia toimittajan tiloissa sen sijaan, että varastoitaisiin jalostettuja materiaaleja yrityksen tiloissa. Tämä lisäisi joustavuutta vastata kysynnän muutoksiin tai muuttuviin asiakkaiden tarpeisiin.

## Toimittajien monipuolistaminen

Toimittajien monipuolistamisella yritykset voivat vähentää riippuvuuttaan yksittäisistä toimittajista ja vähentää pulasta tai toimitusketjun katkeamisesta aiheutuvaa riskiä. Jos yrityksillä on useita toimittajia useissa maissa, tämä strategia mahdollistaa myös yritysten joustavan reagoinnin odottamattomiin tapahtumiin kuten esimerkiksi poliittiset tapahtumat ja yksittäisten maiden asettamat vientirajoitukset. Toimittajien monipuolistaminen voi auttaa lisäämään kilpailukykyä, sillä laajempi globaali toimittajaverkosto voi lisätä kilpailua toimittajien välillä, mikä lisää myönteisiä vaikutuksia sekä raaka-aineiden hintaan että laatuun. Vuorovaikutus tavarantoimittajien kanssa tekee markkinoista myös merkittävästi läpinäkyvämpiä, vertailukelpoisempia ja yrityksille ymmärrettävämpiä. Tärkeimmät haasteet tätä strategiaa käytettäessä ovat sopivien toimittajien tunnistaminen ja entistä monimutkaisempien toimittajien seuranta ja koordinointi. Yritysten tulee tehdä kustannus-hyötyanalyysit ja arvioida huolellisesti uudet toimittajat varmistaakseen tämän strategian onnistumisen. Toimittajia valittaessa on suositeltavaa käyttää kattavia mittaristoja, jotka sisältävät puhtaasti taloudellisten näkökohtien lisäksi sosiaaliset- ja ympäristönäkökohdat. Yrityksiä kehoitetaan myös luomaan IT-rajapintoja toimittajiensa kanssa, jotta tietojen automaattinen vaihto reaaliajassa olisi mahdollista ja koordinointiin liittyviä resursseja voidaan minimoida.

## Pitkäaikaiset sopimukset

Pitkäaikaiset toimitussopimukset ovat strategia, jonka tavoitteena on varmistaa jatkuva raaka-aineiden saanti. Tarvittavan raaka-ainemäärän saannin takaamisen lisäksi pitkäaikaisissa sopimuksissa voidaan käyttää myös erilaisia hintaturvamekanismeja, kuten hintakattoja, indeksoituja hintoja, kiinteitä hintoja tai monimutkaisempia hinnansäätömekanismeja. Pitkäaikaisten sopimusten rakenteet ovat erittäin joustavia ja mukautettavissa yrityksen tarpeisiin. Niitä käytetään laajalti ja ne ovat hyväksi havaittu keino varmistaa raaka-aineiden saatavuus. Yleensä pidemmän aikavälin sopimukset lisäävät toimitusvarmuutta. Toisaalta mahdollisuudet reagoida lyhyen aikavälin markkinakehitykseen ovat rajalliset, ja pitkäaikaiset sopimukset velvoittavat yrityksen yleensä ostamaan sovitut määrät raaka-aineita, vaikka yrityksen lopputuotteen kysynnän muutos merkitsisi sitä, että koko määrää ei enää tarvita. Raaka-ainetarpeiden luotettava ennustaminen ja hyvät neuvottelutaidot yrityksen sisällä ovat siksi avainasemassa tämän strategian onnistumisessa. Näin ollen yrityksiä suositellaan hyödyntämään liiketoiminnan työkaluja tulevaisuuden raaka-ainetarpeiden luotettavaksi määrittämiseksi ja perustan luomiseksi optimaalisten sopimuskausien, määrien ja hintajärjestelyjen tunnistamiselle. Yleisesti ottaen on suositeltavaa tasapainottaa pitkäaikaisten, lyhytaikaisten, kiinteiden ja muuttuvien sopimusten käyttöä tietyn joustavuuden säilyttämiseksi. Sopimusneuvotteluun ja -suunnitteluun keskittyvä ulkopuolinen tuki voi myös olla hyödyllistä neuvottelutaitojen kehittämisessä.

### **Muutamista yrityksistä muodostuvat ostoryhmät**

Ostoryhmät ovat useiden yritysten yhteenliittymiä, joissa yritysten raaka-ainetarpeet yhdistetään ja hankitaan yhdessä. Ne tarjoavat yksittäisille yrityksille tavan vahvistaa asemaansa neuvotteluissa tavarantoimittajien kanssa. Ostoryhmät hankkivat suurempia määriä raaka-aineita kuin yksikään niiden jäsenistä, mikä antaa ylimääräistä neuvotteluvoimaa saada parempia hintoja ja muita ehtoja. Tämän strategian tärkeimmät haasteet ovat valmisteluprosessin monimutkaisuus, ryhmän jäsenten erilaiset tavoitteet sekä riski tietojen ja kaupankäyntikäytäntöjen ei-toivotusta paljastumisesta kilpailijoille. Tuottavan ja kestävän yhteistyön varmistamiseksi kaikkien kumppanien aikomukset tulee analysoida yksityiskohtaisesti ja koordinoida ennen ostoryhmään liittymistä tai perustamista. Yhteistyö kannattaa tehdä muiden alojen yritysten kanssa, jotta arkaluonteisia tietoja ei paljasteta kilpailijoille. Kun ostoryhmä on perustettu, läpinäkyvä ja avoin viestintä kaikkien jäsenten välillä on erittäin tärkeää. Tätä voidaan edistää varhaisessa vaiheessa laadituilla käytännönsäännöillä, tavoitteilla ja prosesseilla. On myös järkevää pohtia, voidaanko yhteistyötä laajentaa muille alueille (esim. yhteiset kierrätyslaitokset), sillä se voi luoda lisää synergiaetuja. Tietysti ostoryhmien on toimittava voimassa olevan kilpailulain puitteissa.

### **Materiaalin käytön tehostaminen**

Materiaalin käytön tehostaminen (materiaalitehokkuus) tarkoittaa sitä, kuinka paljon materiaalia käytetään ja hukataan tuotteen valmistuksessa. Korkea materiaalitehokkuus osoittaa alhaista jätetasoa ja materiaalin kokonaiskäyttöä. Materiaalitehokkuuden lisääntyminen vähentää raaka-aineiden kulutusta tuotetta kohden. Tämä tarkoittaa, että raaka-aineita on hankittava pienempiä määriä, mikä vähentää yrityksen toimitus- ja hintariskiä. Materiaalitehokkuutta voidaan lisätä teknisillä innovaatioilla, tuotemalleja muuttamalla tai valmistusprosesseja asteittain parantamalla. Materiaalitehokkuusprojektien suurimmat haasteet ovat innovaatioiden, tuotantoprosessien muuttamisen ja uusien koneiden hankinnan kustannukset ja aika. Tämän strategian onnistumiseksi on erittäin tärkeää, että yritykset ovat avoimia innovaatioille sekä jatkuvan parantamisen kulttuurille. On suositeltavaa kannustaa ja palkita työntekijöiden ponnisteluja materiaalitehokkuuden lisäämiseksi. Palkkiot voivat olla taloudellisia tai ei-taloudellisia. Sisäisiä työryhmiä tulisi perustaa tunnistamaan parannusmahdollisuudet, jotka voidaan saavuttaa käyttämällä liiketoiminnan työkaluja, mitkä auttavat paljastamaan virheiden ja tehottomuuden kohteet.

### **Kierrätys**

Kierrätys tuotantoprosessissa tarkoittaa syntyvän jätteen ja elinkaarensa päähän tulneiden tuotteiden materiaalin uudelleenkäyttöä. Kierrätys vähentää yrityksen tarvitsemien ensisijaisten raaka-aineiden määrää, mikä tekee yrityksestä vähemmän riippuvaisen toimittajista, toimitusketjuista ja näiden materiaalien saatavuudesta. Lisäksi kierrätysprojektit parantavat usein yrityksen mainetta. Kierrätys voidaan suorittaa sisäisesti tai ulkopuolisten asiantuntijoiden toimesta. Kierrätyksen suurimmat haasteet ovat alhaiset kierrätysasteet, kierrätysmateriaalien huonompi laatu verrattuna neitseelliseen materiaaliin sekä taloudellinen ja teknologinen toteutettavuus. Jotta kierrätys onnistuisi, yritysten on kehitettävä sopiva infrastruktuuri, jotta asiakkaat voivat palauttaa käytöstä poistettuja tuotteita. Tärkeää on myös, että kierrätysmateriaalien laatu on mahdollisimman lähellä alkuperäisten materiaalien laatua ja kierrätysteknologioiden ja -prosessien kehittämiseen tulee olla riittävä tekninen ja taloudellinen kapasiteetti. Kierrätettävyyden tulee harkita varhaisessa vaiheessa, mieluiten tuotekehitysvaiheessa. Kierrätys vaatii suuria investointeja, joten saattaa olla suositeltavaa tehdä yhteistyötä muiden yritysten tai tavarantoimittajien kanssa verkostojen perustamiseksi käytöstä poistettujen tuotteiden keräämiseksi tai yhteisten kierrätyslaitosten perustamiseksi. Yritysten on myös jatkuvasti parannettava sisäisiä prosesseja jätteiden keräykseen, käsittelyyn ja kierrätykseen parhaiden käytäntöjen ja parannettujen teknologioiden saatavuuden perusteella.

## **Materiaalin korvaus**

Materiaalin korvaaminen tarkoittaa kriittisten raaka-aineiden korvaamista vaihtoehdoilla, joilla pyritään vähentämään yrityksen riippuvuutta alun perin käytetystä raaka-aineesta ja siten minimoimaan hinta- ja toimitusriskiä. Raaka-aineiden korvaaminen voi myös vähentää yrityksen riippuvuutta yksittäisistä toimittajista ja auttaa saavuttamaan kestävä kehityksen tavoitteet, ja siihen liittyvä innovaatio voi luoda uutta markkinapotentiaalia. Materiaalien korvaamisen suurimmat haasteet ovat tekninen toteutettavuus, laadun tai olennaisten ominaisuuksien menettämisen välttäminen sekä korkeat kehityskustannukset. Lisäksi materiaalien korvaaminen on usein laaja-alainen kokonaisuus, joka vaatii muutoksia myös tuotanto-, hankinta- ja logistiikkaprosesseihin. Tämän strategian onnistunut toteuttaminen vaatii siksi riittävästi resursseja ja aikaa sekä ylimmän johdon täyttä tukea. Yritysten tulee ennen materiaalin korvausprojektiin ryhtymistä tutkia perusteellisesti, mitkä korvaavat materiaalit ovat jo markkinoilla käytössä ja selvittää, missä tutkimus- tai toteutusvaiheessa mahdolliset uudet korvaavat materiaalit ovat. Tässä analyysissä tulee ottaa huomioon myös muut tekijät, kuten tekniset ominaisuudet, kustannukset, suorituskyky, asiakkaiden tarpeet, korvaavan materiaalin saatavuus ja kestävyys. Pääomamenojen vähentämiseksi yritysten tulisi tutkia, onko julkista tukea saatavilla. On myös suositeltavaa harkita yhteistyötä julkisten tutkimuslaitosten kanssa tai tutkimusallianssien muodostamista muiden yritysten kanssa.

## **Pystysuuntainen integrointi**

Pystysuuntaisella integroinnilla tarkoitetaan liiketoiminnan laajentamista yrityksen omassa toimitusketjussa. Pystysuuntaiset integraatiohankkeet vaihtelevat laajenemisen laajuuden (enemmistö- tai vähemmistöomistus), laajentumiskeinojen (perustaminen tai hankinta) ja laajentumissuunnan (ylä- tai loppupään) mukaan. Osuuden hankkiminen tuotantoketjun alkupään yrityksistä tarjoaa suoran pääsyn raaka-aineisiin tai tuotteisiin. Tämä mahdollistaa pitkän aikavälin sekä toimitusriskin, että hintariskin lieventämisen. Toimittajat, materiaalinjalostusyritykset, kaivosyhtiöt ja kierrätysyritykset ovat erityisen tärkeitä pystysuuntaisen integraation kohteita. Osallistuminen kaivosten kehitys- ja malminetsintäprojekteihin tarjoaa lisää mahdollisuuksia varmistaa kriittisten resurssien saatavuus varhaisessa vaiheessa. Riittävät taloudelliset resurssit, laaja asiantuntemus ja joustava organisaatorakenne ovat ratkaisevia tämän strategian onnistuneelle toteuttamiselle. Yritysten kannattaa tehdä kattavia analyysejä strategian toteutettavuuden sekä ihanteellisen integroinnin laajuuden ja keinojen määrittämiseksi. Tässä analyysissä tulee ottaa huomioon sisäiset tekijät, kuten yrityksen raaka-ainetarpeet, kustannukset, asiantuntemus ja integraatiokyky, sekä ulkoiset tekijät, kuten pystysuuntaisen integraation vaikutus yrityksen maineeseen ja raaka-aineiden laatuun. Myös potentiaalisten kohdeyritysten taloudellinen tilanne, odotettavissa olevat kassavirrat ja markkinaympäristö on analysoitava laajasti. Tarvittavan asiantuntemuksen kehittämiseksi yrityksen sisällä tulisi suorittaa koulutusta ja kohdennettua rekrytointia, jota täydennetään ulkopuolisten lähteiden, kuten asiantuntijakonsulttien ja lakitoimistojen avulla.

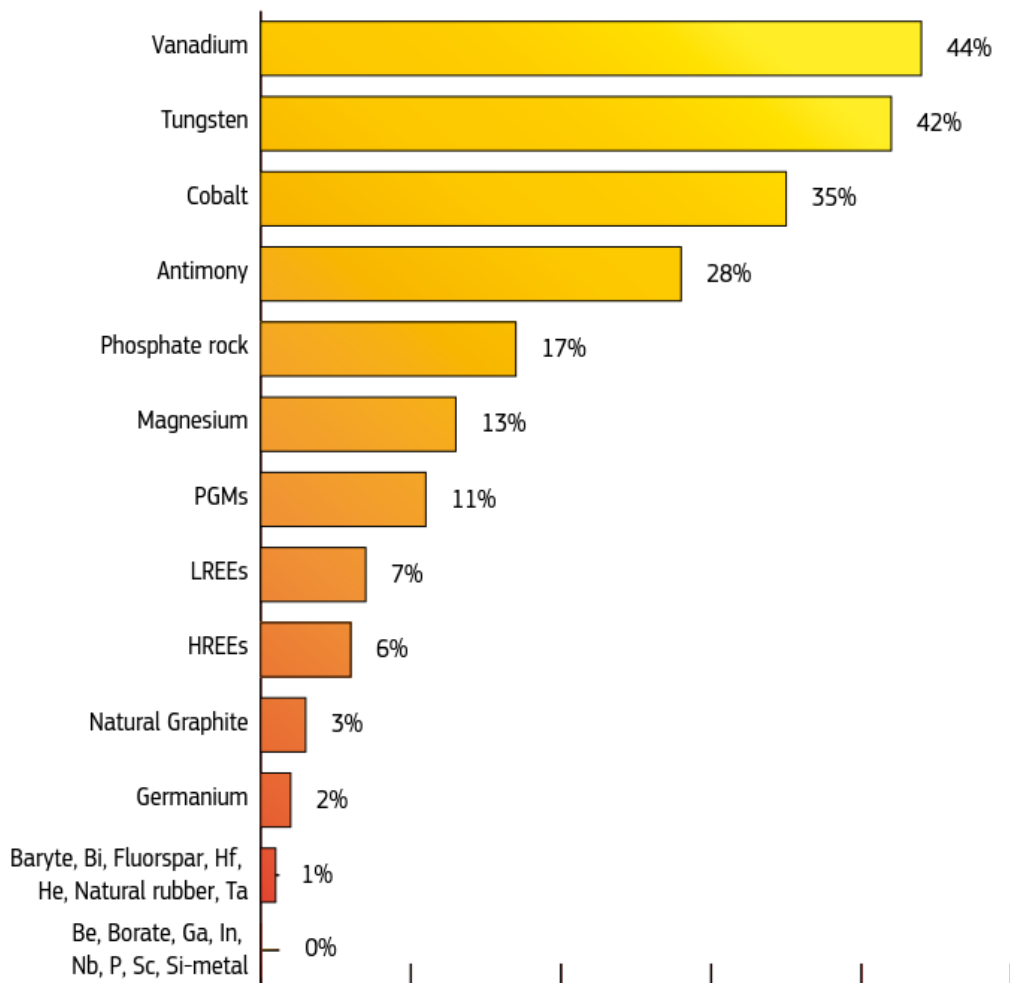
## **IT ratkaisut päätöksentekoon**

Liiketoimintatyökalut ovat IT-sovelluksia, jotka on suunniteltu parantamaan päätöksentekoa johtamisprosesseissa, kuten suunnittelussa, arvioinnissa, ennustamisessa ja seurannassa. Hankinnassa näiden työkalujen avulla voidaan laskea, seurata ja ennustaa monenlaisia KPI:itä, kuten tarvittavien raaka-aineiden määrää, raaka-aineiden saatavuutta, toimitusvarmuutta ja hintoja. Jotkin työkalut tarjoavat yhteisen IT-rajapinnan toimittajien integroimiseksi, mikä mahdollistaa suoran automatisoidun tiedonvaihdon ja materiaali virtojen seurannan. Liiketoimintatyökalut mahdollistavat hankintojen reaaliaikaisen seurannan ja hallinnan. Niitä voidaan käyttää sekä ennakkoarvointijärjestelmänä että pitkän aikavälin suunnittelun parantamiseen, mikä auttaa minimoimaan sekä hinta- että toimitusriskiä. Keskeisiä haasteita ovat oikeiden ohjelmistoratkaisujen valinta ja integrointi olemassa olevaan IT-infrastruktuuriin. Jotta yritystyökaluja voidaan käyttää menestyksekkäästi, on tärkeää, että yritykset ymmärtävät, mitä ratkaisuilla halutaan saavuttaa ja kuinka tarvittavat tiedot hankitaan ja käsitellään. Tämän

ymmärryksen saavuttamiseksi yritysten tulisi aloittaa analysoimalla status quotaan ja vaatimuksiaan. Tämä korostaa sovelluksen käytön tavoitteita ja sitä, mitä yritys sovellukselta haluaa, sekä laadullisen ja määrällisen tiedon tämänhetkistä saatavuutta ja yrityksen IT-infrastruktuurin nykyistä tilaa. Ohjelmistoratkaisua hankittaessa yritysten on otettava huomioon myös sellaiset tekijät kuin skaalautuvuus, yhteensopivuus, räätälöintimahdollisuudet, toteutuksen monimutkaisuus, tuki, ylläpito ja tietoturva. Monimutkaisissa hankkeissa saattaa olla suositeltavaa hankkia ulkopuolista tukea valinta- ja toteutusprosessiin. IT-infrastruktuurin lisäksi myös liiketoimintatyökalut tarvitsevat asianmukaista organisatorista infrastruktuuria hyödyntääkseen potentiaaliaan. Osastojen välinen yhteistyö IT-osaston ja hankintaosaston välillä on erittäin tärkeää, ja sitä tulisi edistää työpajoilla tai nimetyillä IT-liikekumppaneilla.

## 7. KRIITTISTEN METALLIEN KIERRÄTYSTILANNE EU:SSA

Vaikka useilla kriittisillä metalleilla on korkea tekninen ja reaalitaloudellinen kierrätyspotentiaali ja hallitukset ovat rohkaisseet siirtymään kohti kiertotaloutta, kriittisten metallien kierrätyspanos (sekundaaristen lähteiden osuuden raaka-ainetoimituksissa) on yleensä alhainen (kuva 27). Tämä voidaan selittää useilla tekijöillä kuten sillä, että lajittelu- ja kierrätysteknologioita ei ole vielä saatavilla monille kriittisille metalleille kilpailukykyisin hinnoin. Monien kriittisiä metalleja sisältävien laitteiden tarjonta on tällä hetkellä jumittunut pitkäikäisiin omaisuuseriin, mikä merkitsee viiveitä valmistuksen ja romuttamisen välillä. Tämä vaikuttaa negatiivisesti nykyisiin kierrätysnopeuksiin. Monien kriittisten metallien kysyntä kasvaa eri sektoreilla ja kierrätyksen panos on suurelta osin riittämätön vastaamaan kysyntään<sup>44</sup>.



Kuva 27. Kierrätyksen nykyinen panos EU:n CRM-kysynnän tyydyttämiseen - End-Of-Life recycling Input Rate (EOL-RIR) (JRC:n kehitys perustuu vuoden 2017 CRM-tutkimukseen ja MSA:n tutkimukseen 2015)<sup>45</sup>.

Joillakin kriittisillä metalleilla, kuten vanadiumilla, volframilla, koboltilla ja antimonilla, on korkea kierrätysnopeus. Muilla kriittisillä metalleilla on hyvä kierrätysaste käyttöiän lopussa (esim. platinametallien kierrätysaste on jopa 95 % teollisuuskatalyyteillä ja 50–60 % autokatalyyteillä), mutta tämä osuus on suurelta osin riittämätön vastaamaan kasvavaan tarpeeseen. Kysyntä ja siten myös kierrätyspanosaste on alhainen esimerkiksi platinametallien osalta (14 %).

<sup>44</sup> European Commission, Gislev, M., Groho. M. et al, Report on Critical Raw Materials in the Circular Economy, 2018.

<sup>45</sup> European Commission, Gislev, M., Groho. M. et al, Report on Critical Raw Materials in the Circular Economy, 2018.

Joidenkin kriittisiä metalleja sisältävien järjestelmien uudelleenkäyttötekniikat ja -prosessit ovat vakiintuneita. Esimerkiksi palladiumin kierrätys sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta, joka sisältää painettuja piirilevyjä, on vakiintunut ja kaupallinen käytäntö. Lyijyakuista peräisin olevan antimonin ja litiumioniakuista (Li-ion) ja nikkelimetallihybridikuista (NiMH) peräisin olevan koboltin kierrätys on taloudellisesti kannattavaa ja sitä harjoitetaan jo teollisessa mittakaavassa. Harvinaisten maametallien (REE) kierrätystä loistelamppujen loistejauheista harjoitettiin vuoteen 2016 asti. Teknisesti tämä kierrätysprosessi on siis käytännössä jo teollisessa mittakaavassa. Toiminta pysähtyi REE-hintojen laskun vuoksi vuoden 2011 huipun jälkeen, joten ei voitu selvittää, soveltuuko tämä prosessi myös CRT-fluoresoiville jauheille.

Tietyille tuotteille ja komponenteille jatkuva kierrätysteknologioiden kehitys mahdollistaa pian teollisen mittakaavan toiminnan. Tämä ei kuitenkaan tapahdu, ellei tarvittavaa rahoitusta ja riittävää määrää raaka-ainetta ole saatavilla. Esimerkiksi Suomessa on kehitetty uudenlaisia, hydrometallurgiaan<sup>46</sup> ja vihreän kemiaan perustuvia käsittelyprosesseja<sup>47</sup>, joiden avulla saadaan talteen myös sellaisia kriittisiä metalleja, joita nykyisin yleisesti käytössä olevat mekaaniset ja pyrometallurgiset prosessit eivät saa talteen. Tämän selvityksen yhteydessä tehdyssä haastattelussa vastaajat ovat sitä mieltä, että teknologian kaupallistaminen vaatii kuitenkin merkittäviä investointeja, sekä metallikierrätysalan asennemuutosta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kriittisten metallien kierrätys riippuu monista muuttujista. Kiertokulkuun vaikuttavat suuresti sektorit, joilla kriittisiä metalleja käytetään. Kriittisten metallien kysyntä ja käytön kesto riippuvat tuotteista, joiden osana kriittiset metallit ovat. Kierrätysasteet riippuvat yleensä niiden elinkaaren lopussa olevien tuotteiden luonteesta. Lisäksi useiden kriittisten metallien kiertokulku hyötyy voimakkaasti eri aloilla toteutetusta tuottajavastuujärjestelmästä, jonka kautta materiaalit palautuvat kiertoon.

<sup>46</sup> Weeefiner Oy:n kotisivu: [www.weeefiner.fi](http://www.weeefiner.fi)

<sup>47</sup> 3R-Cycle Oy:n kotisivu <https://r-cycle.fi/>

## 8. KYSELY SUOMALAISILLE TEOLLISUUSYRITYKSILLE

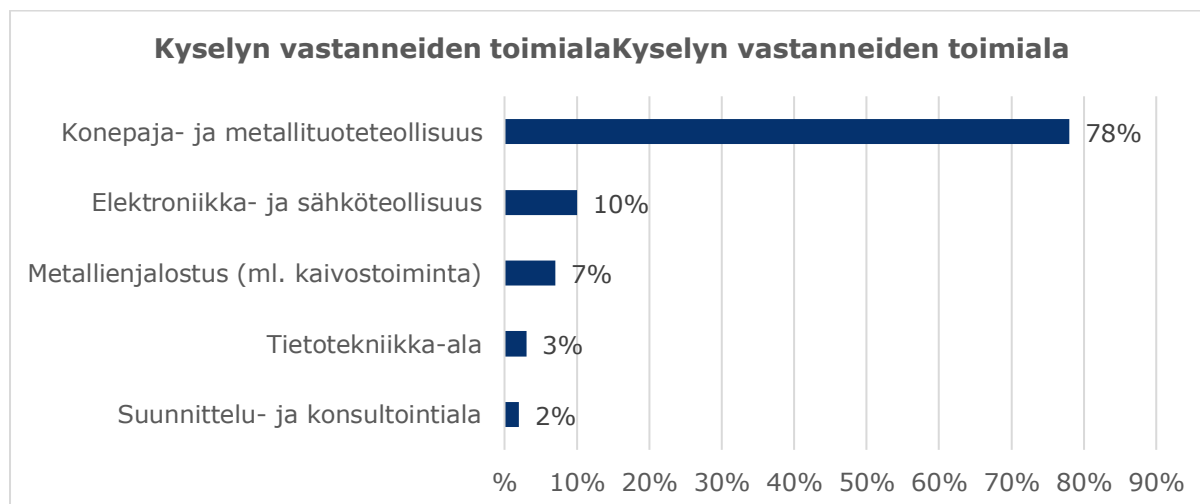
Kesällä 2022 suomalaisiin teollisuuden alan yrityksiin toteutetun verkkokyselyn tavoitteena oli kartoittaa kriittisten metallien ja metalliyhdisteiden käyttöä suomalaisissa ja Suomessa toimivissa teollisuusyrityksissä.

Tavoitteena oli luoda tilannekuvaa mm. seuraavista asioista:

- Mitkä ovat yrityksen toiminnan kannalta kriittiset metallit ja metalliyhdisteet
- Ostavatko yritykset itse suoraan näitä materiaaleja markkinoilta vai käyttävätkö valmiita Komponentteja, jotka sisältävät kriittisiä metalleja ja metalliyhdisteitä
- Mitkä ovat yritysten käyttämien metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyyden taustatekijöitä
- Millaiset tekijät voisivat vaikuttaa rajuimmin näiden metallien hintaan tai saatavuuteen
- Onko yrityksissä pyritty korvaamaan näitä metalleja vähemmän kriittisillä materiaaleilla
- Onko yrityksellä riskienhallintatoimenpiteet käytössä kyseisistä metalleista ja mitkä ne ovat?
- Mitkä ovat meneillä olevan Ukrainan sodan vaikutukset
  - Mitkä ovat kriittisyyden kannalta tärkeimmät metallit, joita yritys on hankkinut Ukrainaista tai Venäjältä ennen sotaa?
  - Tuoko yritys edelleen näitä metalleja Ukrainasta tai Venäjältä? Millaisia haasteita tuontiin liittyy (mm. logistisia, rahaliikenne, hinta, sanktiot, tuontikielto jne.)?
  - Onko yritys löytänyt vaihtoehtoisia toimitusketjuja näille metalleille? Mistä maasta tai toimittajilta metalleja on hankittu? Kuinka suuri prosentuaalinen osuus toimitusketjusta näissä toimituksissa on kyseessä?
  - Jatkuuko kriittisten metallien toimitusvaikeudet edelleen?

### 8.1 Verkkokyselyn toteutus

Verkkokysely toteutettiin 15.6 - 31.7.2022 välisenä aikana. Kysely on lähetetty Teknologiateollisuus ry:n noin kahdelle tuhannelle jäsenyrityksille. Kyselyyn saatiin 83 vastausta (kuva 28). Suurin osa vastaajista oli konepaja- ja metallituoteteollisuudesta. Eri teollisuusalojen jakauma noudattaa edellisen vuonna 2017 toteutetun kyselyn vastausten jakaumaa.



Kuva 28. Kyselyyn vastanneiden yritysten alat.

### 8.2 Suomalaisille yrityksille kriittiset metallit

Kyselyssä vastaajilta kysyttiin, mitkä ovat yrityksen toiminnan kannalta kriittiset metallit tai metalliyhdisteet. Vastaajat saivat valita viisi toimintansa kannalta kriittisintä metallia ja

metalliyhdistettä tärkeysjärjestyksessä taulukosta 4. Taulukko perustuu EU:n kriittisten materiaalien listaan vuodelta 2020. Valintalistan lisäksi vastaajat pystyivät myös lisäämään omalle toiminnalle kriittisiä metalleja tai metalliyhdisteitä vapaan tekstin kentän avulla.

**Taulukko 4. Kyselyssä mukana olleet kriittiset metallit ja metalliyhdisteet.**

|                |                                  |               |
|----------------|----------------------------------|---------------|
| Antimoni (Sb)  | Hafnium (Hf)                     | Vanadiini (V) |
| Baryytti       | Raskaat harvinaiset maametallit* | Skandium (Sc) |
| Beryllium (Be) | Kevyet harvinaiset maametallit*  | Pii (Si)      |
| Vismutti (Bi)  | Indium (In)                      | Tantaali (Ta) |
| Boraatti       | Magnesium (Mg)                   | Volframi (W)  |
| Koboltti (Co)  | Litium (Li)                      |               |
| Koksi          | Titaani (Ti)                     |               |
| Bauksiitti     | Niobium (Nb)                     |               |
| Gallium (Ga)   | Platinaryhmän metallit*          |               |
| Germanium (Ge) | Strontium (Sr)                   |               |

\* Raskaat harvinaiset maametallit (dysprosium, erbium, europium, gadolinium, holmium, lutetium, terbium, thulium, ytterbium, yttrium)

\* Kevyt harvinaiset maametallit (cerium, lanthanum, neodymium, praseodymium and samarium)

\* Platinaryhmän metalli (iridium, palladium, platinum, rhodium, ruthenium)

Metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyyden määrittelyssä on huomioitu, kuinka moni vastanneista on määritellyt aineen kriittiseksi, sekä kuinka merkittävä aineen kriittisyys on. Listaus on toteutettu tarkastelemalla kaikkien (83 kpl) vastausten kriittisyyksien sijoitusten (1–5) keskiarvoja, huomioiden myös vastaukset, jotka eivät kyseistä metallia tai metalliyhdistettä määrittäneet toimintansa kannalta kriittiseksi. Kyselyn perusteella kriittisyyden mukaan listatut metallit ja metalliyhdisteet ovat esitettynä taulukossa 5. Huomioitavaa on, että yksikään vastanneista ei tunnistanut galliumia, hafniumia, indiumia, scandiumia tai sortiumia viiden kriittisimmän metallin tai metalliyhdisteen joukkoon. Vain yksi yritys valitsi germaniumin, baryten, borateksen tai bismuthin toiminnan kannalta kriittiseksi.

Kriittisimmäksi metalliksi tai metalliyhdisteeksi tunnistettiin koboltti. Kyselyyn vastanneista yrityksistä 24 % arvioi koboltin kuuluvan toimintansa kannalta kriittisimpiin metalleihin, joista 35 % kertoi koboltin olevan toiminnassaan kriittisin. Vastaajista noin 20 % listasi myös volframin (engl. tungsten) kriittisimpiin metalleihin tai metalliyhdisteisiin. Volframin kriittisiin metalleihin valinneilla se sijoittui kaikilla kolmen kriittisimmän joukkoon. Kolmanneksi kriittisimmäksi metalli tai metalliyhdisteeksi vastaajat arvioivat magnesiumin, joka oli noin 18 % vastaajille viiden kriittisimmän metallin tai metalliyhdisteen joukossa. Jotkut vastaajista eivät arvioineet yhtäkään listatuista metalleista tai metalliyhdisteistä organisaatiossaan kriittiseksi. Kriittisyyttä kommentoitiin esimerkiksi seuraavasti:

”Tärkeä ja tällä hetkellä korvaamaton osa tuotetta”

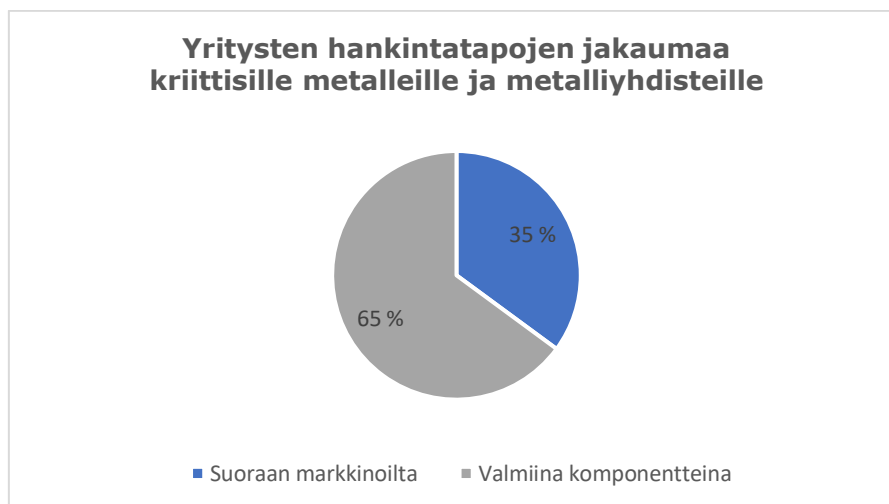
”Listassa ei ollut meille kriittisiä metalleja”

**Taulukko 5. Listaus metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyydestä kyselyn vastausten perusteella.**

| Metalli tai metalliyhdiste      | Viiden kriittisimmän joukkoon valinneiden lukumäärä (kpl) | Sijoituksen keskiarvo (5 kriittisin, 1 viidenneksi kriittisin) |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Koboltti (Co)                   | 20                                                        | 3,9                                                            |
| Volframi (V)                    | 17                                                        | 3,9                                                            |
| Magnesium (Mg)                  | 15                                                        | 3,4                                                            |
| Litium (Li)                     | 11                                                        | 3,1                                                            |
| Antimoni (Sb)                   | 6                                                         | 4,5                                                            |
| Titaani (Ti)                    | 10                                                        | 2,5                                                            |
| Koksi                           | 5                                                         | 3,8                                                            |
| Vanadiini (V)                   | 6                                                         | 3,2                                                            |
| Bauksiitti                      | 4                                                         | 3,8                                                            |
| Kevyet harvinaiset maametallit  | 4                                                         | 3,8                                                            |
| Niobium (Nb)                    | 7                                                         | 1,9                                                            |
| Pii (Si)                        | 3                                                         | 4,3                                                            |
| Platinaryhmän metallit          | 3                                                         | 3,7                                                            |
| Tantaali (Ta)                   | 4                                                         | 2,8                                                            |
| Beryllium (Be)                  | 3                                                         | 2,3                                                            |
| Raskaat harvinaiset maametallit | 2                                                         | 2,5                                                            |
| Germanium (Ge)                  | 1                                                         | 4                                                              |
| Baryytti                        | 1                                                         | 3                                                              |
| Boraatti                        | 1                                                         | 3                                                              |
| Vismutti (Bi)                   | 1                                                         | 2                                                              |
| Gallium (Ga)                    | 0                                                         | -                                                              |
| Hafnium (Hf)                    | 0                                                         | -                                                              |
| Indium (In)                     | 0                                                         | -                                                              |
| Skandium (Sc)                   | 0                                                         | -                                                              |
| Strontium (Sr)                  | 0                                                         | -                                                              |

### 8.3 Kriittisten metallien hankinta

Vastaajilta kysyttiin ostaako yritys toiminnalleen kriittisimpiä metalleja suoraan markkinoilta vai käyttäkö se valmiita komponentteja, jotka sisältävät kriittistä metallia. Kyselyn vastausten perusteella noin 35 % tunnistetuista metalleista ja metalliyhdisteistä hankitaan suoraan markkinoilta ja 65 % valmiina komponentteina (kuva 29).



**Kuva 29. Vastausjakauma eri hankintatavoista yrityksissä.**

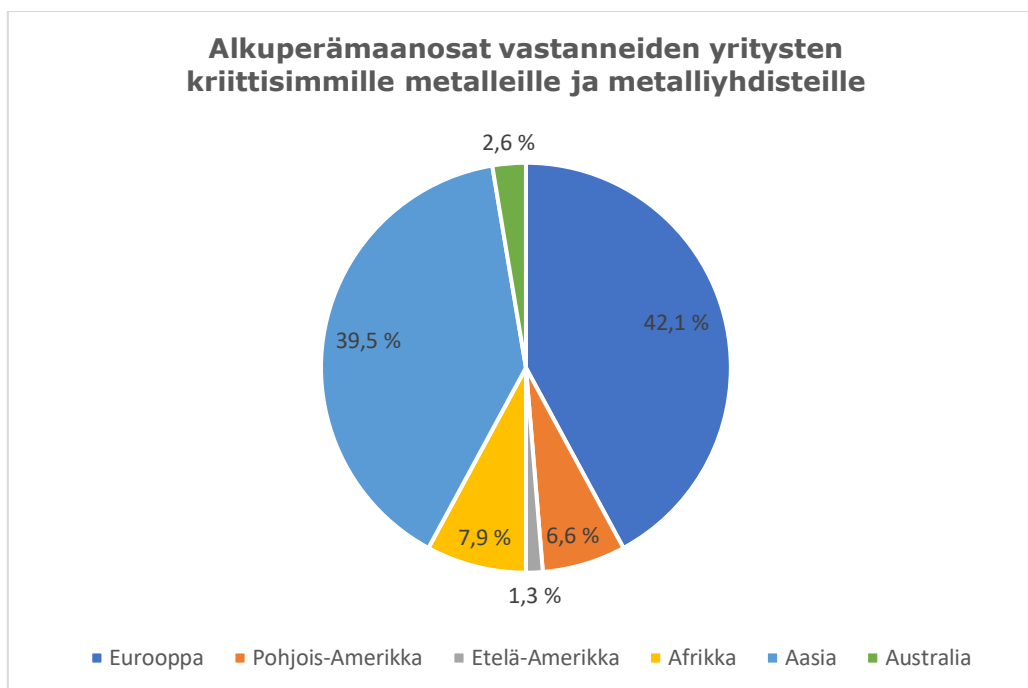
Avointen vastausten perusteella kriittisiä metalleja on usein valmiiden komponenttien seosaineena. Suoraan markkinoilta hankintaa tai komponentteina hankintaa kommentoitiin esimerkiksi seuraavasti:

”Ostamme suoraan raaka-aine toimittajilta”

”Ostamme valmiita terässeoksia, emme hanki yksittäisiä aineita”

”Käytämme komponentteja, joissa on kriittisiä materiaaleja”

Suurin osa vastanneista yrityksistä tekee kriittisten metallien ja metalliyhdisteiden hankintaansa Euroopasta (42 %) ja/tai Aasiasta (40 %) (kuva 30). Vastanneista noin 36 % käyttää myös vähintään osittain pohjoismaista hankintaa toimintansa tärkeimmille kriittisille metalleille ja metalliyhdisteille.



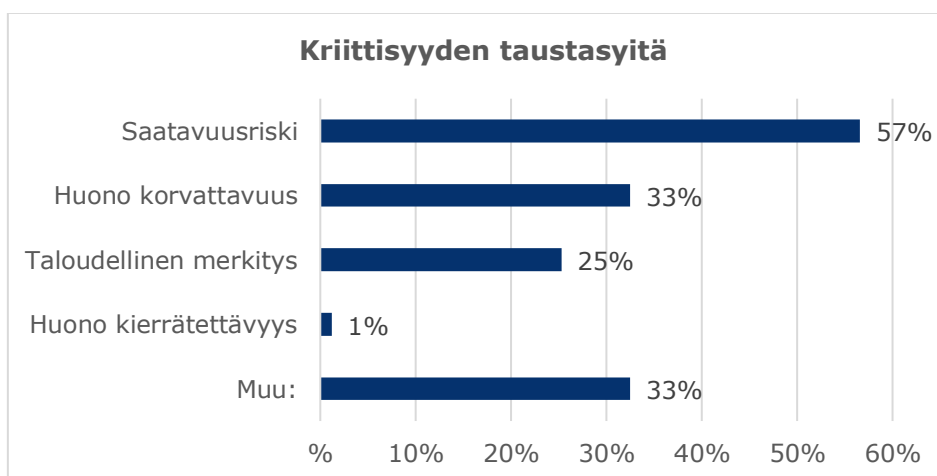
**Kuva 30. Kriittisten metallien ja metalliyhdisteiden hankinnan jakaumaa eri maanosista.**

Avointen vastausten perusteella vähintään 26 % vastanneista yrityksistä hankkivat kotimaasta kriittiset metallit ja metalliyhdisteet. Kaikilla vastaajilla ei ollut myöskään selkeää tietoa metallien tai metalliyhdisteiden alkuperästä, kuten seuraavassa avoimessa vastauksessa todetaan:

”Emme tunne mistä teräs/valurauta seoksiin tulevat lisäaineet tulevat. Käytämme pääasiassa toimittajia”

#### 8.4 Suomalaisen yritysten näkemys kriittisyyden taustatekijöistä

Kyselyssä selvitettiin yritysten käyttämien metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyyden taustatekijöitä. Kyselyn vastauksista havaitaan (kuva 31), että saatavuusriski pidettiin listatuista vaihtoehtoista merkittävimpänä kriittisyyden määrittäjänä. 57 % vastaajista oli vastannut saatavuusriskin vaikuttavan heidän käyttämiensä metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyyteen. Myös huono korvattavuus ja taloudellinen merkitys tunnistettiin monissa vastauksissa kriittisyyttä lisääväksi. Avoimissa vastauksissa nousi esiin, että osa metalleista on käytetty kriittisten terässeoksien valmistuksessa.

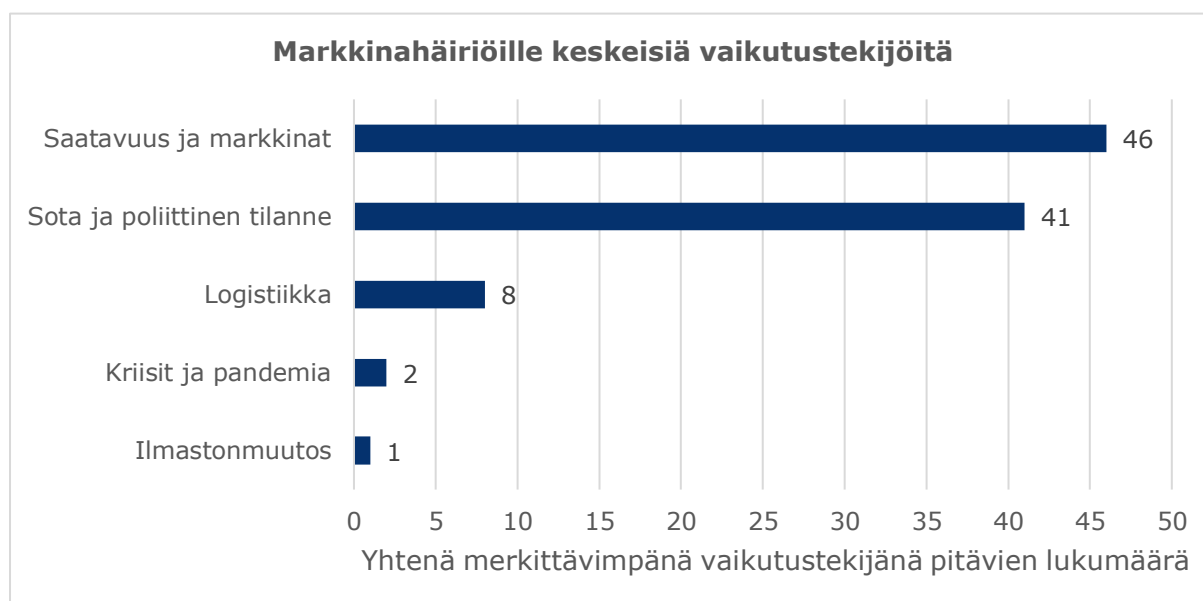


**Kuva 31. Kyselyn tuloksia metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyyden taustatekijöistä.**

### 8.5 Todennäköisimmät syyt markkinahäiriöille

Kyselyssä vastaajilta kysyttiin, millaiset tekijät voisivat vaikuttaa rajuimmin näiden metallien hintaan tai saatavuuteen. Saatavuus kuvastaa sitä, miten varmasti metalli tai metalliyhdiste on tarvittaessa käytettävissä, mikä on vastausten perusteella merkittävin vaikutustekijä. Muita mahdollisesti hintaan ja saatavuuteen vaikuttavia merkittäviä tekijöitä metalleille ja metalliyhdisteille tunnistettiin vastausten perusteella markkinat, poliittinen tilanne ja sota, sekä logistiikka ja siitä aiheutuva kustannusten nousu (kuva 32). Avointen vastausten perusteella vaikutustekijöitä ryhmiteltiin viiteen eri kokonaisuuteen, saatavuus ja markkinat, sota ja poliittinen tilanne, logistiikka, kriisit ja pandemia ja ilmastonmuutos. Hintaan tunnistettiin vaikuttavan monet tekijät ja jo realisoituneetkin riskit, kuten seuraavassa avoimessa vastauksessa kommentoidaan:

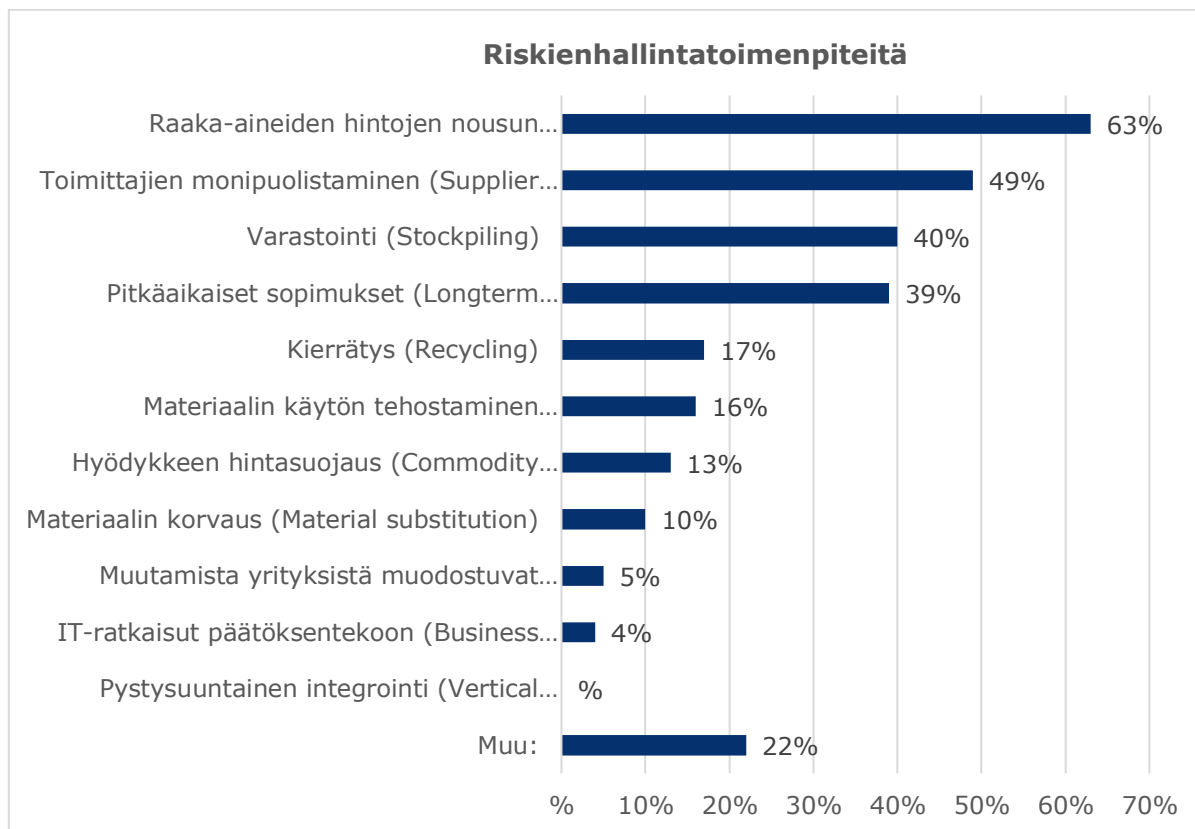
”Turvallisuuspoliittiset kriisit, ilmaston muutoksen seurauksena lisääntyvät sään ääri-ilmiöt, jotka voivat aiheuttaa esimerkiksi kaivosten tulvimista (mitä on joskus tapahtunutkin).”



Kuva 32. Markkinahäiriöitä aiheuttavat vaikutustekijät kyselyn perusteella.

### 8.6 Yritysten riskienhallintasuunnitelmat

Merkittäviin muutoksiin pyritään kyselyn vastausten perusteella varautumaan erilaisin riskienhallinnanmenetelmin, joista käytetyimmät ovat hintojen nousun siirtäminen asiakkaalle, toimittajien monipuolistaminen, varastointi sekä pitkäaikaiset sopimukset (kuva 33).



Kuva 33. Monivalinnassa tunnistettujen riskienhallintatoimenpiteiden jakauma.

Huomattavaa on, että kaikki vastaajat, joilla kriittisiä metalleja tai metalliyhdisteitä on käytössä, tunnisti joitain riskienhallinnanmenetelmiä käytettävän. Muita riskienhallinnankeinoja mainittiin, kuten:

”Emoyhtiön osaomistus kriittiseen toimittajaan.”

”Ainut mahdollinen: Toimittajien kilpailuttaminen.”

## 8.7 Ukrainan sodan vaikutukset

Poliittinen tilanne ja sota ovat vaikuttaneet merkittävästi hankintojen toteuttamiseen. Kyselyssä kysyttiin, mitkä ovat kriittisyyden kannalta tärkeimmät metallit ja metalliyhdisteet, joita yritys on hankkinut Ukrainaista tai Venäjältä ennen sotaa. Ennen Ukrainan ja Venäjän sodan alkua tärkeimmät metallit ja metallituotteet, joita vastausten perusteella kyseisistä maista hankittiin, oli teräs, erityisesti hiiliteräs. Hankintaa Venäjältä tai Ukrainasta tehtiin muutamissa yrityksissä myös nikkelille, kuparille ja alumiinille. Vastausten perusteella lähes kaikki kyseiset hankinnat on nyt pysäytetty ja mahdollisesti korvattu muilla alkuperillä. Pysäyttämispäätökseen on eniten vaikuttanut sanktiot, pakotteet, saatavuusongelmat (esimerkiksi tehtaiden tuhouduttua) sekä logistiset haasteet.

Kyselyyn vastanneista noin 15 % arvioi, ettei korvaavia hankinta maita ole löydetty (kuva 34). Suurin osa pysäytetyistä hankinnoista on vastausten perusteella korvattu Euroopan sisäisillä hankinnoilla ja osittain Aasian hankinnoilla. Monilla yrityksillä hankintavaikeudet jatkuvat edelleen, etenkin toimitusajat ovat pidentyneet ja hintataso on korkeammalla kuin ennen.



**Kuva 34. Sodan aiheuttaman korvattavuuden tarpeen täyttäminen korvaavalla hankinnalla.**

Metallien ja metalliyhdisteiden saatavuutta sekä hintakehitystä on haastavaa ennustaa pitkällä aikavälillä. Venäjän ja Ukrainan sodan pitkäaikaiset vaikutukset kriittisten metallien hankintaan eivät ole arvioitavissa kyselyn toteutushetkellä, vaikka vaikutuksia voidaan jo havaita.

## 9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Keskustelu metallien kriittisyydestä on aikaisemmin keskittynyt saatavuusriskeihin ja Kiinan poliittisiin uhkiin. Tässä raportissa on pyritty siihen, että kriittisyyttä tarkastellaan laajemmalla näkökulmalla. Saatavuusriskin ja taloudellisen merkityksen lisäksi kriittisyyteen vaikuttaa vihreän siirtymän aiheuttama kysynnän kasvu, eri teollisuudenalojen (mukaan lukien perinteiset- ja kasvualat) ja valtioiden välinen kilpailu kriittisistä metalleista sekä arvoketjun eri vaiheiden saatavuusriskit. Arvoketjun eri vaiheiden saatavuusriskien liittyy raaka-aineen lisäksi myös esimerkiksi jatkojalostettujen tuotteiden ja komponenttien saatavuusriski.

Verrattuna edelliseen esiselvitykseen vuodelta 2017 suomalaiset konepaja- ja metallituoteteollisuusyritykset ovat paremmin varautuneet saatavuusriskeihin. Kaikilla yrityksillä, jotka käyttävät kriittisiä metalleja, on jonkinlainen riskinhallintamenetelmä käytössä. Toisaalta vastausaktiivisuus muissa teollisuusyrityksissä (metallijalostus-, elektroniikka- ja sähköteollisuus sekä tietotekniikka-ala) oli tämän selvityksen yhteydessä tehdyssä kyselyssä hyvin alhainen, kuten vuoden 2017 selvityksen yhteydessä tehdyssä kyselyssä. Tämä voi johtua tiedon puutteesta kriittisistä metalleista kyseisillä aloilla tai kriittisyys ilmenee yrityksissä epäsuorasti esimerkiksi komponenttien muodossa.

Kriittisten metallien kierrätystilanteessa ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia verrattuna vuoden 2017 selvityksen tilanteeseen. Kriittisiä metalleja ei kierrätetä teollisella tasolla, vaikka uusia teknologioita on kehitetty. Kriittisten metallien riittävyys on todellinen haaste ja yritysten on etsittävä aktiivisesti uusia vaihtoehtoisia materiaaleja tai pyrittävä muokkaamaan prosessejaan niin, että tuotteissa käytetyt materiaalit palautuisivat takaisin yritysten prosesseihin. Uusien teknologioiden kaupallistamiseen tarvitaan rahoitusta sekä asenteen ja toimintatapojen muutosta.

Yritysten välistä yhteistyötä on vahvistettava. Tietoisuutta ja ymmärrystä metallien ja metalliyhdisteiden kriittisyydestä tulee lisätä ja merkittävät pullonkaulat ja haasteet tulee tunnistaa koko arvoketjun osalta. Tutkimusta EU-tasolla on saatavilla, mutta aiheesta tarvitaan lisää tutkimusta kansallisella tasolla. Kaikille suomalaisille merkittäville strategisille aloille tulee tehdä kartoitus, jossa selvitetään jokaiselta alalta koko arvoketjuun liittyvät saatavuusriskit. Selvityksen pohjalta luodaan riskienhallintastrategia koko Suomen tasolle.

Viranomaisten ohjauskeinot (taloudellinen, lainsäädännöllinen ja informaatio-ohjaus) pitää kohdistaa riskienhallintastrategioiden implementoinnin mahdollistamiseen esimerkiksi edesauttamalla uusien teollisuussektorien syntymistä tai mahdollistamalla olemassa olevien teollisuudenalojen toimiminen Suomessa tai laajemmin Euroopassa. Komission puheenjohtajan Ursula von der Leyenin 14.9.2022 pitämässä State of the Union 2022 -puheessa otettiin esille EU Critical Raw Materials Act -aloite. Aloite sisältää uusia toimenpiteitä EU:n kriittisistä metalleista ja mineraaleista. Aloitteessa käsitellään muun muassa kriittisten metallien ja mineraalien varmuusvarastointia ja eurooppalaisten hankkeiden edistämistä sekä rahoitusta. Aloitteen tarkempi sisältö ja aikataulu on vielä julkistamatta tämän selvityksen julkaisemisen hetkellä.

Arvoketjun eri vaiheiden saatavuusriskit tarkoittavat sitä, että huoltovarmuus raaka-aineen tasolla ei välttämättä riitä. Toisaalta eri teollisuusalojen koko arvoketjun kattava huoltovarmuus on vaikea järjestää kansallisella tasolla keskitetysti. Huoltovarmuus on todennäköisesti varmistettava pääasiassa yritysten riskienhallinnan kautta. Isossa kuvassa metallit eivät tule riittämään nykyisten ennusteiden mukaan kaikille. Yritysten pitäisi keskittyä enemmän metallien kierrätykseen, kiertotaloutta edistävään tuotesuunnitteluun sekä materiaalien korvattavuustutkimuksiin perinteisten toimitusketjun riskienhallintamenetelmien lisäksi.

Ilmastokriisin, ylikulutuksen ja luontokadun rinnalle on noussut uusia uhkakuvia. Selvityksen julkaisemisen hetkellä Euroopassa on energiakriisi Venäjän Ukrainan hyökkäyksen seurauksena.

Euroopan riippuvuus muualta tulevasta energiasta on konkretisoitunut karulla tavalla. Koko Euroopan ja Suomen on ryhdyttävä toimeen kriittisten metallien huoltovarmuuden varmistamiseksi viimeistään nyt. Energiakriisi ei saa eskaloitua materiaalikriisiksi. Yhteiskunnan kriittisten sektoreiden riippuvuutta yksinvaltaisista toimijoista tulee välttää ja järjestelmän resilienssiä tulee parantaa. Muutos vaatii systeemitason ajattelumallin muutosta lineaaritaloudesta kohti kiertotaloutta.

## LIITE 1. KRIITTISTEN METALLIEN OMINAISUUDET JA KÄYTTÖKOHTEET

Tässä kappaleessa on lyhyt kuvaus valittujen kriittisten metallien ominaisuuksista, sekä käyttökohteista. Kriittiset metallit ovat valittu selvityksen luvun 9 kyselyn tulosten perusteella.

### Koboltti (Co)

Koboltti on siirtymämetalleihin kuuluva kova metalli, joka on raudan tavoin magneettista. Koboltti esiintyy yleisesti muiden metallien, kuten nikkelin ja kuparin, kanssa monimetallimalmeissa. Suurin osa koboltin tuotannosta saadaan nikkelin sivutuotteena. Koboltin kierrätys on tehokasta, sillä noin neljäsosa teollisuuden tarvitsemasta koboltista tuotetaan romumetallista<sup>48</sup>. Akkuteollisuus käyttää nykyisin 57 prosenttia globaalista koboltintuotannosta. Koboltti on kriittinen raaka-aine mm. litiumioniakuille. Loput 43 prosenttia käytetään erilaisissa teollisissa- ja sotilaallisissa sovelluksissa, kuten metalliseoksissa (esim. superlejeerinkiosissa lentokoneiden suihkumoottoreissa, korroosion- ja vedenkestävissä seoksissa sekä timanttityökaluissa), magneeteissa, katalyytteinä kemianteollisuudessa, elektrolyytteinä päällysteinä keramiikassa ja maaleissa. Koboltti on hivenaineena tärkeä monille eliöille, myös ihmiselle. Se on keskeinen komponentti B12-vitamiinissa<sup>49</sup>.

### Volfram/Tungsten (W)

Volframi on erittäin tiheä, kiiltävä, hopeanvalkea, metallinen alku - aine, jonka sulamispiste (3423 °C) on toiseksi korkein kaikista se - koittamattomista metalleista. Ainoastaan hiilen sulamispiste on korkeampi. Volframilla on monia ainutlaatuisia ominaisuuksia, minkä seurauksena se on usein olennainen osa monissa kaupallisissa, teollisissa ja sotilaallisissa sovelluksissa. Korkean sulamispisteen ja tiheyden lisäksi volframi on erittäin vahvaa, kulutusta ja venytystä kestävä, sillä on matala laajenemiskerroin ja hyvä lämmön- ja sähkönjohtokyky. Tärkeitä käyttökohteita on mm. rakentamisessa, kaivostyössä, metallintyöstössä sekä öljy- ja kaasuteollisuudessa käytettävien kovametallien valmistuksessa (volframikarbidi). Terästeollisuudessa volframi on tärkeä seosaine ja siitä valmistetaan monenlaisia tuotteita, kuten lankoja, koskettimia ja elektrodeja eri käyttötarkoituksiin. Volframikemikaaleja käytetään mm. katalysaattoreiden valmistuksessa, ruosteenestopäällysteissä, väriaineissa ja pigmenteissä. Volframi on yksi kaikkein kierrätetyimpiä metalleja, kierrätysaste 35–40 prosenttia<sup>50</sup>.

### Magnesium (Mg)

Magnesium on pehmeä ja yleisessä käytössä olevista metalleista kevyin. Magnesium painaa 30 prosenttia vähemmän kuin alumiini ja vain neljänneksen teräksestä. Magnesiumia käytetään pelkistimenä valmistettaessa muita metalleja (titaani, zirkonium, hafnium, beryllium), lisäksi se on ainesosana monissa metalliseoksissa. Magnesium kestää hyvin korroosiota bensiinissä ja monissa öljyissä, mutta ei kloridipitoisissa liuoksissa eikä mineraalihapoissa. Myös magnesiumseosten korroosionkesto on heikko, joten ne on suojattava pinnoitteella. Muiden metallien rinnalla magnesiummetallit toimivat anodeina. Seostamalla magnesiumin sekaan muita metalleja saadaan parannettua sen lujuusominaisuuksia. Hyvin magnesium - pitoisissa metalliseoksissa yhdistyvät lujuus ja keveys, ja siksi ne ovat tärkeitä esimerkiksi lentokoneteollisuudessa sekä monissa instrumenteissa. Magnesium on ihmisille ja eläimille välttämätön kivennäisaine<sup>51</sup>.

### Litium (Li)

<sup>48</sup> Kihlman, S. & Lauri, L.S. (2013) Kriittiset metallit ja mineraalit sekä niiden alueellinen jakautuminen ja esiintymispotentiaali Suomen ja Fennoskandian alueilla. Geologian tutkimuskeskus, 102/2013.

<sup>49</sup> Cobalt institute kotisivu, 6.9.2022, <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/>

<sup>50</sup> Kihlman, S. & Lauri, L.S. (2013) Kriittiset metallit ja mineraalit sekä niiden alueellinen jakautuminen ja esiintymispotentiaali Suomen ja Fennoskandian alueilla. Geologian tutkimuskeskus, 102/2013.

<sup>51</sup> Wikipedia 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Magnesium>

Litium on kevyin kaikista metalleista. Keveytensä vuoksi litiumia käytetään kovissa ja kevyissä metalliseoksissa. Yksi tärkeimmistä litiumin yhdisteistä on litiumkarbonaatti, jota käytetään muun muassa emalien valmistuksessa, metallurgiassa fluksina eli esimerkiksi alentamaan alumiinin sulamispistettä ja muiden litiumyhdisteiden valmistuksessa. Teollisuudessa käytetään paljon litiumpohjaisia voiteluaineita, jotka kestävät korkeitakin lämpötiloja eivätkä kovetu kylmissä lämpötiloissa. Litiumia käyttävä litiumioniakku on hyvin yleinen akkuteknikka. Siinä katodina on esimerkiksi litiumkooltitioksid<sup>52</sup>.

### Antimoni (Sb)

Antimoni luokitellaan usein puolimetalliksi, sillä se on muutoin metallin kaltainen ja muistuttaa erityisesti lyijyä, mutta johtaa huonosti sähköä. Se on hopeanhohtoinen kova ja hauras aine. Sen sulamispiste on 630 °C ja kiehumispiste 1 635 °C. Sen erikoinen ominaisuus on, että se laajenee jähmettyessään. Antimoni on käytössä lyijy- ja tinametalliseoksissa kovuuden lisäämiseen (laakerit ja kirjapainolaatat). Puhtaana antimonia käytetään infrapunailmaisimissa ja diodeissa. Antimonitrisulfidia on tulitikkujen sytytysmassassa, nalleissa ja väriaineena. Antimonitrioksidia lisätään muoveihin palamista hidastavaksi kemikaaliksi. Palon sattuessa se reagoi palavan aineen kanssa muodostaen tahmean kerroksen, joka tukahduttaa liekit<sup>53</sup>.

### Titaani (Ti)

Titaani on kiiltävä ja hopeinen metalli, jonka sulamispiste on korkea (1 668 °C). Titaani kestää korroosiota erittäin hyvin. Titaanin tiheys on suhteellisen pieni, mutta sillä on hyvät mekaaniset ominaisuudet. Alumiinin ja tinan kanssa yhdistetyn lejeeringin voimakkuus-massa-suhde on hyvin korkea. Muita yleisiä lejeerinkimetalleja ovat rauta, vanadiini, kupari, koboltti ja mangaani. Teräksen korroosion kestävyttä voidaan parantaa lisäämällä titaania seokseen. Titaania käytetään moottoreissa, mutta sen tärkein käyttökohde on ilmailuteollisuudessa. Lentokoneisiin ja avaruusaluksiin käytetäänkin kaksi kolmasosaa tuotetusta titaanista. Titaania käytetään tekonivelissä sekä luunmurtumien korjaamisessa tarvittavissa levyissä ja ruuveissa. Titaania käytetään panssareissa ja muissa suojissa. Titaania käytetään myös rakennusteollisuudessa, urheiluvälineissä, tietokoneissa ja kelloissa. Laivateollisuus hyödyntää titaanin hyvää korroosion kestävyttä laivojen rungoissa ja potkureissa. Petrokemian ja kemian teollisuus käyttää titaania putkistoissa ja tuotantovälineissä. Noin 95 % kaikesta käytetystä titaanista käytetään titaanioksidina. Titaanioksidia käytetään maali-, muovi- ja paperiteollisuudessa. Titaanioksidi antaa maaleille valkoisen värin ja sillä on korvattu myrkyllinen lyijykarbonaatti. Titaanioksidia käytetään myös paperi- ja muoviteollisuudessa tekemään materiaaleista läpinäkymättömiä. Titaanioksidi ei läpäise valoa, ja sitä käytetään myös aurinkovoiteissa. Titaania käytetään katalyyttinä alkeiden polymeroinnissa<sup>54</sup>.

### Koksi

Koksi on kivihilestä kuivatislaamalla valmistettua hiiltä, joka on kivihiltä puhtaampaa ja lämpöarvoltaan parempaa polttoainetta. Kivihilen laatu vaihtelee myös paljon, mutta koksen valmistuksella saadaan laatueroja tasoitettua helpottaen muun muassa kulutuslaskelmia. Koksen aikakausi alkoi teräksen massatuotannon myötä ja höyrylaivojen sekä höyryveturien polttoaineena se oli välttämätön riittävän toimintasäteen saavuttamiseksi. Kivihiltä voitiin käyttää vain lyhyillä matkoilla. Tärkein koksen käyttömuoto nykypäivänä ovat metallurgiset pelkistysreaktiot, varsinkin raudan valmistus. Koksen sisältämä hiili toimii pelkistimenä. Masuunissa tapahtuvassa pelkistymisreaktiossa koksen sisältämä hiili riistää metallioksideista hapen hapettuen itse ensin hiilimonoksidiksi ja edelleen hiilidioksidiksi sekä siten pelkistää metallioksidit vapaiksi metalleiksi<sup>55</sup>.

<sup>52</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Litium>

<sup>53</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Antimoni>

<sup>54</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Titaani>

<sup>55</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Koksi>

## Vanadiini (V)

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 terästuotannon sivutuotteena. Lisäksi vanadiinia saattaa esiintyä hiili- ja öljyesiintymien yhteydessä. Vanadiinin merkittävin käyttökohde on teräksen tuotanto sen terästä lujittavan ominaisuuden vuoksi. Muut vanadiinin markkinasegmenttejä ovat titaaniyhdisteet ja kemianteollisuus, jossa vanadiinia käytetään erityisesti katalyyttinä, mutta myös erityislasiin tuotannossa, keraamisena pigmenttinä sekä petrokemian sovelluksissa. Vanadiini käytetään myös akkusovelluksessa sekä energian varastointiratkaisuissa<sup>56</sup>.

## Bauksiitti

Bauksiitti on syväkivilajien rapautumistuote, joka koostuu suureksi osaksi alumiinioksidista ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ja on tärkeä alumiinin raaka-aine. Bauksiittia esiintyy latosolimaannoksessa lähellä maanpintaa. Bauksiitin värejä ovat valkoinen sekä vaalean keltaiset ja vaaleanpunaiset sävyt. Se on himmeä ja läpinäkymätön. Bauksiitti koostuu alumiinihydroksidimineraaleista kuten gibbsiitti ja böhmiitti, ja mukana on usein myös rautaa ja silikaatteja sisältäviä mineraaleja. Bauksiitti sisältää myös joitain raudan yhdisteitä. Bauksiitti sisältää alumiinioksidia noin 30–60 prosenttia. Bauksiittia syötetään raaka-aineeksi Bayer-prosessiin, jolla siitä jalostetaan alumiinioksidia. Prosessissa yhden alumiinioksiditonnin valmistamiseen tarvitaan 1,9–3,6 tonnia bauksiittia<sup>57</sup>.

## Harvinaiset maametallit

Harvinaiset maametallit (Rare Earth Elements, REE; Rare Earth Metals, REM) on ryhmä, joka koostuu 17 samankaltaisesta, metallisesta alkuaineesta. Lantanidien (järjestysluvut = La 57–71 Lu) lisäksi harvinaisiin maametalleihin luetaan usein kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan samankaltaiset skandium (järjestysluku = 21) ja yttrium (järjestysluku = 39). Metalleina ryhmän jäsenet ovat kiiltäviä, pehmeitä, taipuisia ja reaktiivisia. Väri vaihtelee raudanharmaasta hopeiseen. Aineiden epätavalliset magneettiset ja optiset ominaisuudet johtuvat niiden elektronirakenteesta<sup>58</sup>.

Nimitys harvinaiset maametallit johtuvat siitä, että ne löydettiin aikoinaan maaperässä esiintyvistä harvinaisista oksidimineraaleista, kuten gadoliniitista, joka ensin löydettiin Ruotsin Ytterbystä. Nimitys harvinaiset maametallit on sikäli harhaanjohtava, että niitä löytyy maankuoresta hyvinkin paljon, mutta pieninä pitoisuuksina, mikä tekee niiden tuottamisesta vaikeaa ja kallista<sup>59</sup>.

Tällä 17 metallin ryhmällä on runsaasti erityisominaisuuksia, kuten magneettisuus, valon heijastavuus ja kestävyys. Harvinaiset maametallit ovat tärkeä raaka-aine monille korkean teknologian aloille, kuten uusiutuva energia ja puolustusjärjestelmät<sup>60</sup>.

Jaksollisessa järjestelmässä harvinaisten maametallien järjestysnumerot ovat 21, 39, 57–71. Harvinaiset maametallit voidaan jakaa kevyisiin (Light Rare Earth Elements, LREE) ja raskaisiin (Heavy Rare Earth Elements, HREE) siten, että kevyisiin sisältyvät lantaani, cerium, praseodyymi, neodyymi, prometium, samarium, europium ja gadolinium. Raskaisiin kuuluvat terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium, lutetium ja yttrium. Skandiumia ei yleensä sisällytetä kumpaankaan LREE- tai HREE-ryhmään. Eräissä yhteyksissä sitä ei oteta lainkaan

<sup>56</sup> Grandell, L. (2014) [Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa \[Critical metals in clean energy technology\] \(vttresearch.com\)](https://vttresearch.com/)

<sup>57</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Bauksiitti>

<sup>58</sup> Kihlman, S. & Lauri, L.S. (2013) Kriittiset metallit ja mineraalit sekä niiden alueellinen jakautuminen ja esiintymispotentiaali Suomen ja Fennoskandian alueilla. Geologian tutkimuskeskus, 102/2013.

<sup>59</sup> Bailey Grasso, V. (2012). Rare Earth Elements in National Defence: Background, Oversight Issues, and Options for Congress. Saatavilla verkossa os. <http://china.usc.edu/sites/default/files/legacy/AppImages/crs-2012-rare-earths-national-defense.p>

<sup>60</sup> Morrison, W.M. & Tang, R. (2012). China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States. Congressional Research Service, R42510. Saatavilla verkossa os. <https://fas.org/sgp/crs/row/R42510.pdf>

mukaan harvinaisten maametallien tarkasteluun sen poikkeavasta ionisäteestä ja kemiallisesta luonteesta johtuen<sup>61</sup>.

Harvinaiset maametallit ovat puhtaina metalleina kiiltäviä, hopeisenharmaita tai valkoisia, pehmeitä ja reaktiivisia. Raskaat harvinaiset maametallit muodostavat pinnalleen passivoivan oksidikerroksen ja ovat yleensä vähemmän reaktiivisia kuin kevyet. Ilmankosteus ja metallin epäpuhtaudet nopeuttavat harvinaisten maametallien hapettumista<sup>62</sup>.

Metalliseoksina kevyet harvinaiset maametallit muodostavat keskenään yhtenäisen kiinteän seoksen, samoin kuin raskaat harvinaiset maametallit keskenään. Jos keveitä ja raskaita metalleja pyritään seostamaan, lejeerinkiin voi muodostua kaksi eri faasia. Kevyille harvinaisille maametalleille tunnetaan kaupallisia metalliseoksia, kuten mischmetalli (Mm), joka sisältää vaihtelevasti kevyitä lantanoideja, pääasiassa ceriumia, lantaania, neodyymiä ja praseodyymiä. Toinen tunnettu metalliseos on didyymi (Di), joka on praseodyymin ja neodyymin seos, ja nimetty kun näitä kahta alkuainetta ei vielä osattu tunnistaa erillisinä<sup>63</sup>.

- Scandium (Sc). Skandium soveltuu seosmetalliksi magnesiumin, alumiinin ja raudan lejeerinkeihin. Korkean keston Al-Mg-, Al-Li- ja Mg-lejeeringeissä skandium parantaa korkeissa lämpötiloissa lujuutta ja vähentää virumista tehden metalleista paremmin muotonsa pitäviä. Superlejeerinkejä käytetään pääasiassa ilmailuteollisuudessa. Skandiumia käytetään myös lasereissa, polttokennoissa ja elektroniikan komponenteissa. (Tiihonen, 2014)
- Yttrium (Y). Käytetään lasereissa, kirurgisissa välineissä, syöpälääkkeissä sekä monissa kuluttajatuotteissa, kuten televisioissa ja kameran linseissä.
- Lantaani (La). Käytetään erikoisoptiikan valmistukseen mm. kameroissa ja teleskoopeissa. Se tekee myös teräksestä helpommin muokattavaa. Lantaania käytetään myös jäteveden puhdistuksessa ja öljynjalostuksessa.
- Cerium (Ce). Käytetään promootorina autojen katalysaattoreissa. Tärkeä komponentti myös lasin kiillotuksessa. Ceriumia käytetään myös raudan, magnesiumin ja alumiinin lejeeringeissä sekä magneeteissa ja elektrodeissa.
- Praseodyymi (Pr). Käytetään magneeteissa sekä kestävien metallien valmistamiseen lentokonemoottoreita varten.
- Neodyymi (Nd). Käytetään yhdessä praseodyymin kanssa voimakkaimpien kestopagneettien valmistamiseen. Näitä magneetteja käytetään useimmissa moderneissa ajoneuvoissa ja lentokoneissa sekä kulutuselektroniikassa esimerkiksi kuulokkeissa, mikrofoneissa ja tietokoneiden kiintolevyissä. Sitä käytetään myös tehokkaiden infrapunalasereiden valmistukseen teolliseen ja sotilaskäyttöön.
- Prometium (Pm). Ainoa luonnostaan radioaktiivinen harvinainen maametalli, jota käytetään kelloissa, sydämentahdistimissa ja tutkimuskäytössä.
- Samarium (Sm). Käytetään erittäin voimakkaissa magneeteissa, syöpähoidoissa ja ydinvoimaloiden polttoainesauvojen hallinnassa.
- Europium (Eu). Kova metalli, jota käytetään LCD-näytöissä ja esimerkiksi euron seteleissä väärennösten estämiseksi.
- Gadolinium (Gd). Käytetään MRI- ja röntgenlaitteissa, merkittävässä roolissa modernin lääketieteen ratkaisuissa.
- Terbium (Tb). Pehmeä maametalli, jota voi leikata, vaikka veitsellä. Käytetään mm. värinäytöissä ja lisäaineena kestopagneeteissa, jotta ne kestävät paremmin korkeampia lämpötiloja. Terbiumia käytetään myös polttokennoissa, elektroniikkalaitteissa ja tutkajärjestelmissä.

<sup>61</sup> Tiihonen, A. (2014). Harvinaisista maametalleista ja niiden erotusmenetelmistä. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos.

<sup>62</sup> Tiihonen, A. (2014). Harvinaisista maametalleista ja niiden erotusmenetelmistä. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos.

<sup>63</sup> Tiihonen, A. (2014). Harvinaisista maametalleista ja niiden erotusmenetelmistä. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos.

- Dysprosium (Dy). Toiseksi voimakkaimmat magneettiset ominaisuudet maametalleista holmiumin jälkeen. Dysprosiumia lisätään usein kestopagneetteihin nostamaan niiden lämmönsietokykyä. Sitä käytetään myös lasereissa, valaistuksessa, tietokoneiden kiintolevyissä ja muissa elektronisissa laitteissa ja sähköautoissa.
- Holmium (Ho). Magneettisten ominaisuuksiensa takia holmiumia käytetään voimakkaimpien kestopagneettien materiaalina. Käytetään myös mikroaaltolaitteissa ja ydinreaktoreiden säätösauvoissa.
- Erbium (Er). Käytetään laajasti ydinteknologiassa, metallurgisena lisäaineena, suojalaseissa, lasereissa, sekä optisissa kuiduissa signaalien vahvistamiseksi.
- Thulium (Tm). Käytetään kannettavissa röntgenlaitteissa sekä korkeatehoisissa lasereissa sotilaskäytössä, sairaalalaitteissa ja ilmatieteen sovellutuksissa. Harvinaisuudesta johtuvat kalliit tuotantokustannukset rajoittavat sen käyttöä.
- Ytterbium (Yb). Useita tärkeitä käyttöalueita tiettyjen syöpämuotojen hoidossa. Sitä voidaan käyttää myös teräksen ominaisuuksien parantamiseen ja muissa metalliseoksissa.
- Lutetium (Lu). Käytetään metalliseoksissa ja katalyyttinä sekä öljynjalostuksessa. Harvinainen, tuotantomäärät hyvin pienet.<sup>64 65</sup>

### Niobium (Nb)

Niobium on harvinainen, pehmeä, harmaa ja sitkeä siirtymämetalli. Niobiumia käytetään lähinnä seosmetallina erikoisteräksissä, joita käytetään esimerkiksi kaasuputkissa. Vaikka seokset sisältävät niobiumia enintään 0,1 prosenttia, sillä on jo merkittävä vaikutus teräksen lujuuteen. Hyvän lämmönkestävyytensä ansiosta niobiumia sisältäviä seoksia käytetään esimerkiksi suihkumoottoreissa ja rakettimoottoreissa. Niobiumia käytetään myös usein suprajohtavissa materiaaleissa. Muita sovelluksia niobiumille ovat muun muassa ydinvoimateollisuus elektroniikka, optiikka ja koruteollisuus<sup>66</sup>.

### Pii (Si)

Pii on puolimetalli, joka on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine. Pii on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine. Kiteisellä (puhtaalla, kiinteällä) piillä on metallinen kiilto ja sinertävä värisävy. Sen kiderakenne on timanttimainen. Puolijohteisiin tarvitaan puhdasta piitä, joka sitten seostetaan pienillä määrillä muita sopivia alkuaineita. Piikarbidi (SiC) on puhtaan piin ohella käytössä puolijohdetekniikassa. Piidioksidi on pääkomponenttina lasissa, sementissä ja keramiikassa. Silikonit ovat piin tärkeitä polymeerejä, joita käytetään muun muassa voiteluaineissa, liimoissa, saumaus- ja tiivistemateriaaleissa, rintaimplanteissa ja leluissa<sup>67</sup>.

### Jalometallit

Kultaa, hopeaa, palladiumia ja platinaa on otettu jo pitkään talteen mm. teollisuuden käyttämistä katalyyteistä, autojen katalysaattoreista ja elektroniikkaromusta. Sähkö- ja elektroniikkaromusta saatavat jalometallit saadaan yleensä talteen kuparin sekundääriseen tuotannon yhteydessä. Esimerkiksi tietokoneiden piirikortit sisältävät runsaasti kuparia sekä pieniä määriä jalometalleja, jotka on perinteisesti otettu talteen sulatossa pyrometallurgisella prosessilla. Kupari toimii kollektorina jalometalleille eli jalometallit sitoutuvat kuparivaiheessa muodostuvaan nesteeseen. Kuparivaiheen jälkeen raakakupari puhdistetaan elektrolyysillä, jolloin kulta, hopea, platina ja palladium kerääntyvät elektrolyysissä muodostuvaan anodilietteeseen. Metallit saadaan talteen korkealla puhtausasteella ja hyvillä saannoilla, jotka voivat olla yli 90 prosenttia<sup>68</sup>.

<sup>64</sup>Lynascorp kotisivu: <https://www.lynascorp.com/Pages/Summary-of-Rare-Earths.aspx>

<sup>65</sup>Tiihonen, A. (2014). Harvinaisista maametalleista ja niiden erotusmenetelmistä. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos.

<sup>66</sup>Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Niobium>

<sup>67</sup>Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Pii>

<sup>68</sup>Buchert, M. et al. (2012). Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Oeko-Institut e. V., Freiburg, Germany.

### Niobium (Nb) ja Tantaali (Ta)

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 Niobeeseen. Niobium ja tantaali eivät esiinny luonnossa puhtaan metallina vaan mineraaleissa eri oksidien muodoissa.

Vihreässä energiateknologiassa niobiumia ja tantaalia käytetään CCS-teknologian 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 käyttökohteista 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), työkonereissa, lääketieteen sovelluksissa, lentokoneteknologiassa ja uuneissa. Lisäksi tantaalin käyttökohteita löytyy kemianteollisuudesta<sup>69</sup>.

### Beryllium (Be)

Beryllium on kevyt, erittäin kova, teräksenharmaa metalli, joka kestää korroosiota hyvin. Berylliumilla on korkea lämmön- ja sähkönjohtavuus. Sähkönjohtavuus on suurimmillaan kylmissä lämpötiloissa. Beryllium on mahdollisesti suprajohde, ja sen suprajohtavuuden kriittiseksi lämpötiloiksi on raportoitu 7–11 kelviniä. Beryllium heijastaa infrapunasäteilyä, mutta läpäisee erinomaisesti röntgensäteilyä. Läpäisykyky on esimerkiksi alumiiniin verrattuna 17-kertainen.

Beryllium käytetään loistevalaisimissa, ydinteollisuudessa, röntgensovellutuksissa ja avaruustekniikassa. Berylliumia käytetään kevytmetalliseoksissa, mikäli tarvitaan keveyttä, lujuutta ja jäykkyyttä. Berylliumin metalliseoksista tärkeimmät ovat berylliumkupari ja -nikkeli. Berylliumkuparia käytetään gyroskoopeissa ja tietokoneosissa, kun vaaditaan äärimmäistä keveyttä ja lujuutta, sekä avaruussukkuloiden, ohjusten ja satelliittien tukirakenteissa, kuten myös muita berylliummetalliseoksia. Berylliumkuperiseoksissa berylliumia on tyypillisimmin 0,2–2 massaprosenttia. Beryllium parantaa kuparin kovuutta, ja seoksilla on myös hyvä säänkestävyys ja sähkönjohtokyky. Berylliumnikkeliä käytetään puolestaan erikoisjousissa ja kipinöimättömissä työkaluissa erittäin suuren kovuutensa vuoksi. Ne ovat myös hyvin kestäviä korroosiota vastaan. Berylliumia voidaan käyttää komposiittimateriaalina muun muassa alumiinin ja titaatin kanssa. Berylliumia käytetään myös ydinreaktorien hidastin- ja heijastinaaineena. Beryllium läpäisee hyvin röntgensäteilyä ja siksi sitä käytetään paljon röntgenputkien ja -ilmaisimien ikkunamateriaalina. Berylliumia käytetään myös neutronien valmistukseen, jos berylliumia pommittaa alfasäteilyllä niin siitä vapautuu neutroneita yhtälö  $94\text{Be} + 42\text{He} \rightarrow 126\text{C} + n$ , missä  $42\text{He}$  on alfa-partikkeli<sup>70</sup>.

### Germanium (Ge)

Puhdas germanium on puolijohde, ja puolijohde-elektroniikan sovellukset valmistettiin alkuaikoina germaniumista. Nykyisin pii on korvannut suurelta osin germaniumin. Germaniumia käytetään a-Si-ohutkalvopaneelien valmistukseen parantamaan paneelien sähköntuotannon stabiiliutta. Myös energiatehokkaissa lamputissa 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). Infrapunaoptiikka on 30 %:n osuudella merkittävin markkina. Kuituoptiikka ja

<sup>69</sup> Grandell, L. (2014) [Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa \[Critical metals in clean energy technology\] \(vttresearch.com\)](https://vttresearch.com/)

<sup>70</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Beryllium>

katalyyttinen käyttö muodostavat kumpikin 20 %:n markkinaosuuden. Elektroniikkateollisuus, johon on laskettu ohutkalvopaneelien tuotanto mukaan, vastaa 15 % osuudesta. Muihin kohteisiin kuuluvat loisteaineiden lisäksi mm. germaniumin käyttö lääketieteessä ja metallurgiassa<sup>71</sup>.

### Baryytti

Baryytti eli raskassälpä on sulfaattimineraali, joka on kemiallisesti bariumsulfaattia ( $\text{BaSO}_4$ ). Baryytin nimi on johdos antiikin kreikan kielen sanasta *barús*, joka tarkoittaa raskasta. Baryytti on tärkeimpiä barium-metallin lähteitä. Baryyttiä esiintyy kalkkikivessä sinkkipitoisissa juonissa. Sitä esiintyy joskus selestiinin ja angelsiitin kanssa.

Baryytin tärkein käyttökohde on öljyn- ja kaasun pourauksessa tarvittava painoaine. Baryyttiä käytetään myös hapen ja rikin isotooppianalyseissä. Bariumsulfaattia käytetään pyrotekniikassa ja varjoaineena röntgenkuvauksissa<sup>72</sup>.

### Boraatti

Boraatti on kemiallinen yhdiste, joka sisältää jonkinlaisen boraatti-ionin. Alkuaine boori esiintyy luonnossa tavallisimmin juuri erilaisina boraatteina. Erilaisia boraattiyhdisteitä tunnetaan lukuisia erilaisia. Boraatti-ionit ovat boorin ja hapen muodostamia erilaisia anioneja, joskin kaikki boraatti-ionit voidaan ajatella boorihapon ( $\text{B}(\text{OH})_3$ ) erilaisiksi johdannaisiksi. Perusmuodossaan boraatti-ioneissa on keskusatomina boori, johon on liittynyt joko kolme tai neljä happiatomia. Boraatti-ionit voivat kuitenkin liittyä happiatomien välityksellä toisiinsa muodostaen erilaisia ketjumaisia tai rengasmaisia polyboraatti-ioneja.

Erilaisia metalliboraattiyhdisteitä voidaan muodostaa metallioksidien sekä boorihapon tai erilaisten boraattien välisillä reaktioilla. Korvaamalla silikaatin silikaattiryhmät ( $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ) tetraedrisillä boraateilla ( $[\text{BO}_4]^{5-}$ ), voidaan valmistaa borosilikaattilasiasia, joka tunnetaan yleisesti myös Pyrex-lasina. Boraatti käytetään myös keramiikassa, lannoitteena, rakennusmateriaali-, kemikaali- ja perusmetallin valmistuksessa<sup>73</sup>.

### Vismutti (Bi)

Vismutti on metallinen alkuaine. Vismutilla ei ole pysyviä isotooppeja. Luonnon vismutti (Bi-209) on lievästi radioaktiivinen. Vismutti on näöltään tinan tapaista, hieman punertavaa metallinkiiltoista suurina lehtinä kiteytyvää metallia, jota voidaan jauhata. Vismutilla on suuri sähkövastus ja metalleista elohopean jälkeen alhaisin lämmönjohtavuus. Diamagneettisuus on metalleista vahvin kuten myös Hallin ilmiö. Sulamispisteessä vismutin kiinteä faasi kelluu sulan faasin pinnalla jään tapaan, mikä on alkuaineilla epätavallista.

Vismuttia käytetään helposti sulavissa metalliseoksissa ja magneeteissa. Lähes yhtä painavana ja vähemmän haitallisena aineena kuin lyijy vismuttia käytetään korvaamaan lyijyä kalastuskoukuissa ja -painoissa. Vismutin nykyisiä käyttötarkoituksia ovat myös: vahvojen kestopagneettien valmistus; vartenotettava rooli elektroniikkapiireissä ja seuraavan sukupolven aurinkopaneelien valmistuksessa; tulipalojen tunnistamiseen ja tukahduttamiseen suunnitelluissa turvalaitteissa, koska monilla vismutin seoksilla on alhaiset sulamispisteet; seosaineena taottavien rautojen valmistuksessa; lämpöparimateriaalina; kannattimena U-235- ja U-233-polttoaineelle ydinreaktoreissa; lyijyvapaissa juotoksissa; ainesosana voitelurasvoissa; sekä katalyyttinä akryylikuituja valmistettaessa<sup>74</sup>.

<sup>71</sup> Grandell, L. (2014) [Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa \[Critical metals in clean energy technology\]](https://vttresearch.com/) (vttresearch.com).

<sup>72</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Baryytti>

<sup>73</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Boraatti>

<sup>74</sup> Wikipedia: 6.9.2022, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Vismutti>

## LIITE 2. KRIITTISTEN RAAKA-AINEIDEN MERKITYS TEOLLISILLE EKOSYSTEEMEILLE<sup>75</sup>

|                  | Aerospace/<br>defence | Textiles | Electronics | Mobility/<br>Automotive | Energy-<br>intensive<br>industries | Renewable<br>energy | Agri-<br>food | Health | Digital | Constructi<br>on | Retai<br>l | Proximity<br>/ social<br>economy | Tourism | Creative/<br>cultural<br>industries |
|------------------|-----------------------|----------|-------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------|--------|---------|------------------|------------|----------------------------------|---------|-------------------------------------|
| Antimony         | ✓                     | ✓        |             | ✓                       |                                    |                     |               |        |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Baryte           |                       |          |             | ✓                       | ✓                                  |                     |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Bauxite          | ✓                     | ✓        | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   | ✓             | ✓      | ✓       | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Beryllium        | ✓                     |          | ✓           | ✓                       |                                    | ✓                   |               |        | ✓       |                  |            |                                  |         |                                     |
| Bismuth          | ✓                     |          | ✓           |                         | ✓                                  |                     |               | ✓      | ✓       | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Borate           | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   | ✓             |        | ✓       | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Cobalt           | ✓                     | ✓        | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               |        | ✓       |                  |            |                                  |         |                                     |
| Coking coal      |                       |          |             | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               |        |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Fluorspar        |                       |          |             |                         | ✓                                  |                     | ✓             |        |         |                  | ✓          |                                  |         |                                     |
| Gallium          | ✓                     |          | ✓           | ✓                       |                                    | ✓                   |               |        | ✓       | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Germanium        | ✓                     |          | ✓           |                         | ✓                                  | ✓                   |               |        |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Hafnium          | ✓                     |          | ✓           |                         | ✓                                  | ✓                   |               |        | ✓       |                  |            |                                  |         |                                     |
| Indium           | ✓                     |          | ✓           |                         |                                    | ✓                   |               |        | ✓       |                  |            |                                  |         |                                     |
| Lithium          | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               | ✓      | ✓       |                  |            |                                  |         |                                     |
| Magnesium        | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  |                     |               |        | ✓       | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Natural graphite | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               |        | ✓       | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Natural Rubber   | ✓                     | ✓        |             | ✓                       |                                    |                     |               | ✓      |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Niobium          | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  |                     |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Phosphate rock   |                       |          |             |                         | ✓                                  |                     | ✓             |        |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Phosphorus       | ✓                     |          |             |                         | ✓                                  |                     | ✓             |        |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Scandium         | ✓                     |          |             | ✓                       |                                    | ✓                   |               |        |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Silicon metal    | ✓                     | ✓        | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Strontium        | ✓                     |          | ✓           |                         | ✓                                  |                     |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Tantalum         | ✓                     |          | ✓           |                         | ✓                                  | ✓                   |               |        | ✓       |                  |            |                                  |         |                                     |
| Titanium         | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  |                     |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| Tungsten         | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  |                     |               | ✓      |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| Vanadium         | ✓                     |          |             | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| PGM              | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               | ✓      |         |                  |            |                                  |         |                                     |
| HREE             | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |
| LREE             | ✓                     |          | ✓           | ✓                       | ✓                                  | ✓                   |               | ✓      |         | ✓                |            |                                  |         |                                     |

<sup>75</sup> European Commission, 2020, Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>