

Työkaluja raaka-aineiden kriittisyyden arviointiin

PIRJO-LEENA FORSSTRÖM JA AMANDA EKLUND

Me ihmiset hyödynnämme päivittäin erilaisia luonnonmateriaaleja, kuten mineraaleja ja metalleja. Nämä ovat osa resursseja, joiden avulla yhteiskuntamme toimii. Metallien ja mineraalien lisäksi elintarvikkeet, polttoaineet ja metsäpohjaiset materiaalit ovat välttämättömiä nykyisen kaltaisen yhteiskunnan toiminnan ja taloudellisen turvallisuuden kannalta. Jotkin näistä ovat erityisen tärkeitä ekologisen kestävyyskannalta.

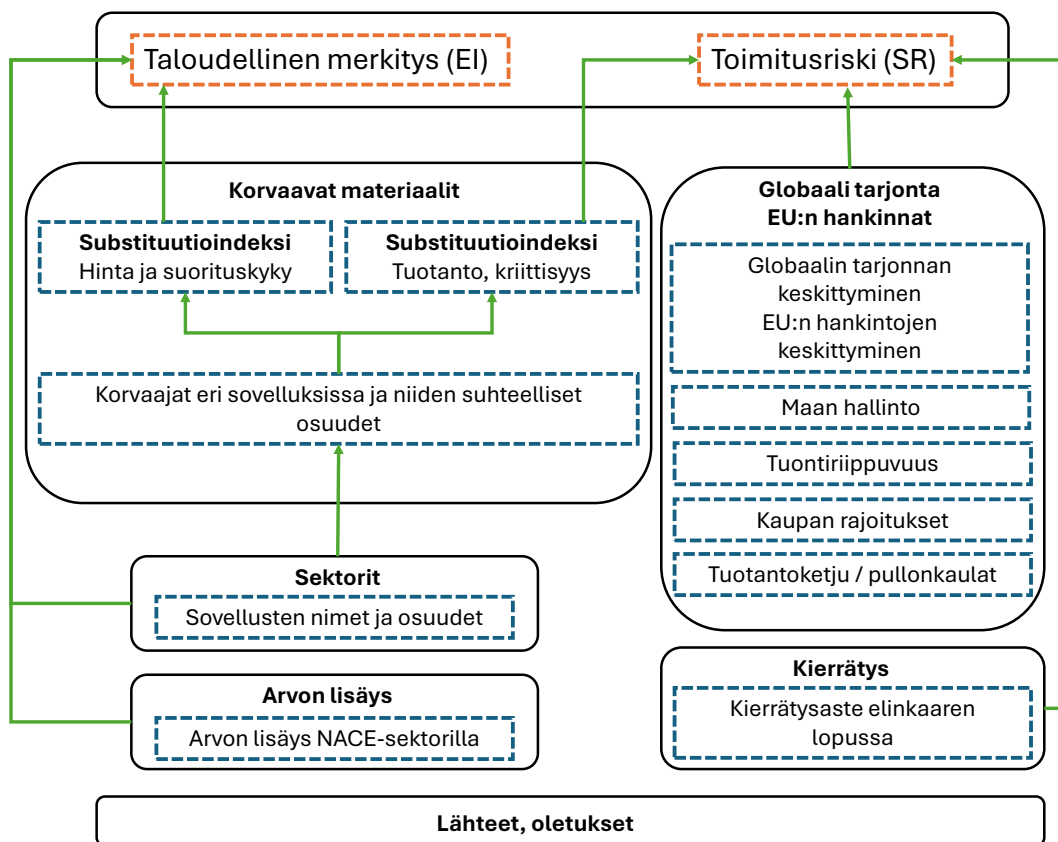
Resursseihin kohdistuu kysynnän lisääntymisen vuoksi kasvavia paineita. Globaalisti tunnistetut haasteet (esim. ilmastonmuutos), konfliktit (esim. geopoliittiset ja taloudelliset jännitteet tai sodat), ruoan ja veden saatavuus, muuttoliike, väestön muutokset ja pandemiat vaikuttavat jatkuvasti sekä itsenäisinä että toisiinsa liittyvinä ilmiöinä globaaliin toimintaympäristöön. Ne myös kärjistävät toimintaympäristön muiden haasteiden vaikutusta. Toimintaympäristöä määrittävät myös energiamurros (Ierides ym. 2025), digitalisaatio, uusien teknologioiden kehitys ja niihin liittyvä globaali kilpailu. Vaikka kaikkien raaka-aineiden kierrätys yleistyy kiertotalouden myötä, energiamurros lisää myös neitseellisten mineraalisten raaka-aineiden louhintaa sekä globaalia kilpailua niiden saatavuudesta. OECD ennustaakin, että maailmanlaajuinen materiaalien kysyntä yli kaksinkertaistuu vuoteen 2060 mennessä nykyisestä 79 miljardista tonnista 167 miljardiin tonniin (OECD 2019). Yhä keskinäisriippuvaisemmassa geotaloudessa keskeiset raaka-aineet, logistiikka ja infrastruktuuri voidaan välineellistää poliittisiin tarkoituksiin. Arvo- ja toimitusketjujen häiriöt ovat nyt osa uhkaympäristöämme. Toimitusketjut ovat pidentyneet ja monimutkaistuneet, ja niitä on yhä vaikeampi hallita. Voimme pian olla riippuvaisempia kriittisistä raaka-aineista kuin öljystä.

Seuraavassa tarkastellaan sitä, miksi tietyistä raaka-aineista tulee kriittisiä, millaisilla tiedoilla arviointia tehdään ja miten kriittisyyttä ennakoidaan yhteiskunnan toiminnan turvaamiseksi.

Mikä on kriittinen raaka-aine?

Kriittiseksi raaka-aineiksi (*Critical Raw Material*, CRM) määritellään sellaiset materiaalit, joilla on suuri taloudellinen merkitys ja suuri toimitushäiriöiden riski. Strategisille raaka-aineille (*Strategic Raw Material*, SRM) on

puolestaan ominaista niiden merkitys strategisille toimialoille, kuten uusiutuvalla energialla, digitaaliteknologialle tai ilmailu- ja puolustus-teknologioille, sekä ennustettu kysynnän ja tarjonnan epätasapaino. Strategiset raaka-aineet ovat siis kriittisiä raaka-aineita, jotka ovat ratkaisevan tärkeitä strategisten tavoittei-



Kuva 1. Raaka-aineiden taloudellista merkitystä ja toimitusriskiä kuvaavien parametrien koostuminen eri tekijöistä. Kuva mukaeltu lähteestä Grohol ja Veeh (2023).

Figure 1. The composition of parameters describing raw material's economic importance and supply risk based on Grohol and Veeh (2023).

den saavuttamiseksi. Käsitteinä kriittisyys ja strategisuus ovat dynaamisia ja määrittävät sekä ajassa että suhteessa muuttuvaan globaaliin toimintaympäristöön. Tämän vuoksi toimintaympäristön ennakointi on oleellista pitkän aikavälin valinnoissa.

Euroopan unioni (EU) kerää tietoa ja laatii kriittisten raaka-aineiden luettelon kolmen vuoden välein. Ensimmäinen luettelo julkaisiin vuonna 2011, viimeisin arvio on vuodelta 2023. Uusin arvio löytyy esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen verkkosivuilta (Geologian tutkimuskeskus 2025).

Kriittisyyden arviointiin on myös julkaistu ohjekirja (European Commission ym. 2017), ja sitä tukemaan on koottu raaka-ainetietojärjestelmä (*Raw Materials Information System*, RMIS) (Georgitzikis 2024).

Kriittisyys muodostuu taloudellisesta merkityksestä (*Economical Importance*, EI) ja toimitusriskistä (*Supply Risk*, SR) eli karkeasti yksinkertaistettuna kysynnästä ja tarjonnasta. Näiden arviointi perustuu useisiin parametreihin (Blengini ym. 2017), jotka on esitetty kuvassa 1.

Raaka-aineen taloudellista merkitystä kuvaava parametri EI pyrkii antamaan käsityksen materiaalin merkityksestä EU:n taloudelle. Tämä määritetään loppukäyttösovellusten ja vastaavien EU:n valmistussektorien arvonnäkökulman kannalta. Taloudellista merkitystä säädetään substituutioindeksillä, joka kuvaa raaka-aineen korvaamisen teknistä helppoutta ja kustannustehokkuutta yksittäisissä sovelluksissa. Raaka-aineen toimitusriskiä kuvaava SR-parametri on yritys arvioida EU:n materiaalitöiden häiriintymisen riskiä. Se perustuu muun muassa hankintojen keskittymiseen, raaka-ainetta tuottavien maiden tarjonnan keskittymiseen, maiden hallintoon ja kauppaan liittyviin näkökohtiin. Esimerkiksi kaupan rajoitukset ja hallinnon ongelmat kasvattavat toimitusriskiä, kun taas materiaalin korvattavuus ja kierrätettävyyden pienentävät riskiä. EU:n tuontiriippuvuuden takia arvioissa huomioidaan erikseen globaalit toimittajat ja maat, joista EU hankkii raaka-aineita. SR-arvo määritetään kyseisen materiaalin tuotannon merkittävimmässä ”pullonkaulavaiheessa” (yleensä louhinta tai käsittely), koska siitä aiheutuu EU:lle suurin toimitusriski.

Erilaiset muutosherrat tekivät siis määrittävät kriittisyyttä, eikä esimerkiksi pelkkä raaka-aineen esiintymien tarkka tuntemus riitä arvioinnissa.

Kriittisyyden tilannekuva

Luotettavan tilannekuvan muodostamiseksi pitää koota arviointiin tarvittavista indikaattoreista johdonmukaisia tietojoukkoja. Merkittävimpiä haasteita tässä ovat tietolähteiden hajanaisuus, tietojen puutteellisuus ja epä johdonmukaisuus, ongelmat tiedon laadussa sekä toimitusketjujen monimutkaisuus. Haasteiden voittamiseksi on koottu raaka-ainetietojärjestelmä RMIS (Georgitzikis 2024), joka tukee raaka-aineita koskevan tiedon johdonmukaista saavutettavuutta. RMIS:n raaka-ai-

nenäkymä tarjoaa tietoa esimerkiksi geologisesta potentiaalista, tarjonnasta, kysynnästä, kaupasta ja kierrätettävyydestä. RMIS:n avulla pyritään varmistamaan, että tiedot ovat mahdollisimman standardoituja ja johdonmukaisia, mikä vähentää useiden erillisten tietokantojen käytöstä mahdollisesti aiheutuvien virheiden riskiä. Vakiomuotoiset tietojoukot puolestaan vähentävät tiedon keräämiseen ja käsittelyyn tarvittavaa aikaa ja resursseja. Ne voivat myös helpottaa yhteistyötä ja tiedon jakamista eri hankkeiden ja aloitteiden välillä, mikä johtaa yhtenäisempään ja koordinoitumpaan lähestymistapaan tutkimuksessa ja analyysissä.

Tilannekuvan indikaattoreina käytetään muuttujien keskiarvoja viiden vuoden ajalta. Tällä hetkellä tietojärjestelmästä löytyy tietoa seuraavista kategorioista ja indikaattoreista: resurssit ja varannot, tuotanto, tarjonnan keskittyminen, käyttötarkoitukset ja sovellukset, kauppa (maailmanlaajuinen), kierrätyksen indikaattorit, EU:n hankinnat, EU:n tuontiriippuvuus materiaali-kohtaisesti ja kestäväyyden indikaattorit. Yksi keskeinen työkalu toimitusketjuihin liittyvän tiedon analysointiin on materiaalisysteemanalyysi. Sen avulla saadaan oleellista tietoa raaka-aineiden käytöstä, elinkaaresta sekä tuonnin ja viennin määristä.

Tilannekuvan täydentäminen uusilla indikaattoreilla etenee koko ajan. Tilannekuvan tarkentuminen antaa parempia mahdollisuuksia paitsi muodostaa kokonaiskuvaa ja ymmärtää nykytilannetta, myös ennakoita tulevaa.

Kriittisyyden ennakointi

Niin yhteiskunnan kuin sen hyödyntämien teknologioiden materiaalitarpeet muuttuvat ajan myötä. Ennakointi auttaa hahmottamaan tulevaisuuden muutoksia, tunnistamaan uusia mahdollisuuksia, vähentämään epävarmuutta ja sopeutumaan tehokkaammin muuttuvassa toimintaympäristössä. Ennakointi tukee tulevaisuutta koskevaa päätöksentekoa, johon liit-

tyy väistämättä epävarmuutta. Ennakoinnissa ei pyritä eikä pystytä ennustamaan täsmällisesti tulevaisuutta. Ennakointia tehdään niin globaalilla (Elsner ym. 2025), EU:n (European Commission 2023) kuin kansallisella tasolla (Valtioneuvosto 2025).

Raaka-aineiden kriittisyyden ennakkoinnissa arvioidaan toimitusketjujen riippuvuuksia, ennustetaan materiaalien kysyntää sekä näihin liittyviä haavoittuvuuksia nyt ja tulevaisuudessa. Aikadimension huomioiminen on oleellista. Tavoitteena on hahmottaa tulevaisuuteen raameja strategisten raaka-aineiden, pullonkaulojen ja vahvistettavien toimitusketjujen osien tunnistamiseksi keskeisissä teknologioissa ja sovelluksissa.

Uusien teknologioiden tarkastelu auttaa ennakoimaan tulevia trendejä ja niiden mahdollisia yhteiskunnallisia, taloudellisia ja turvallisuusvaikutuksia. Teknologian kehittymisen dynaamista prosessia ohjaa useiden tekijöiden yhteisvaikutus. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi tieteelliset läpimurrot, markkinoiden kysyntä sekä tutkimukseen ja kehitykseen investointi. Kehitykseen vaikuttavat siis erilaiset ajurit ja mahdollistavat olosuhteet.

Hyvä kooste teknologiaennakkoinnista on esimerkiksi Farinha ym. (2023), jossa tarkastellaan tulevaisuuden kriittisiä teknologioita noin viiden vuoden aikajänteellä. Tulevaisuuden kriittisillä teknologioilla tarkoitetaan tässä sellaisia teknologioita ja niiden sovelluksia, jotka sisältävät EU:n vaarallisen suuren riippuvuuden riskin muista maista sekä merkittävän vaikutuksen avaruus-, puolustus- ja niihin liittyviin siviiliteollisuuden aloihin. Näitä ovat esimerkiksi kvanttiviestintä ja kryptografia, avaruusala, integroitu fotonikka sekä pienydinvoimalat.

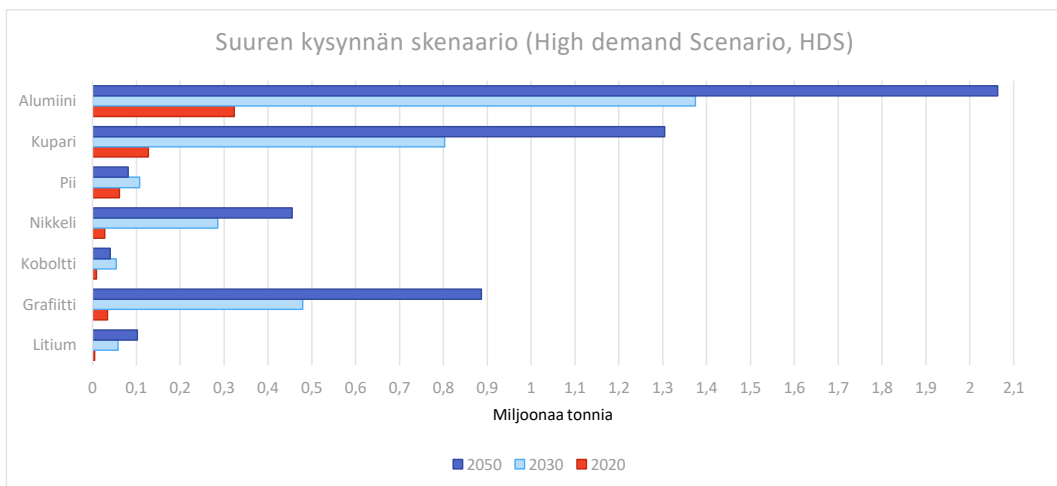
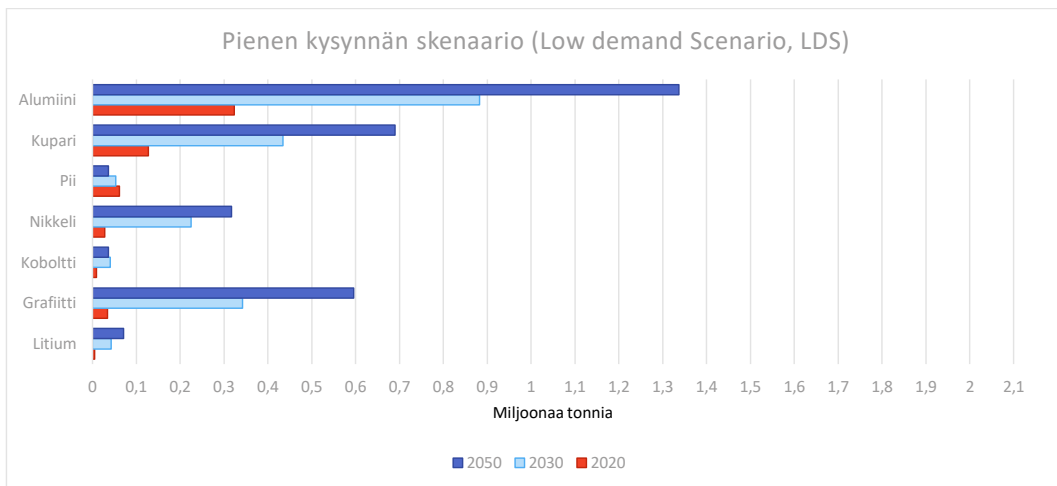
Uusien teknologioiden tunnistaminen ja niiden mahdollisten vaikutusten arviointi sisältävät metodologisia ja analyttisiä haasteita (Eulerts ym. 2025). Menetelminä voidaan hyödyntää esimerkiksi tulevaisuuden kartoitusta, skenaariosuunnittelua tai trendiana-

lyysiä. Myös kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten menetelmien käyttö on yleistä tulevan teknologisen kehityksen ja sen mahdollisten yhteiskunnallisten- ja markkinavaikutusten ennakoimiseksi. Datapohjaisessa teknologian ennakkoinnissa voidaan käyttää dataa eri lähteistä. Esimerkiksi verkkotietojen haravoinnilla voidaan poimia verkosta automaattisesti dataa tai vaihtoehtoisesti hyödyntää perinteisempiä tietokantoja, jotka sisältävät tietoa esim. riskipääomasijoituksista, tutkimusrahoituksesta, patentti-ilmoituksista ja tieteellisistä julkaisuista uusien teknologioiden havaitsemiseksi. Tekoälytekniikoita, kuten koneoppimista tai laajoja kielimalleja, hyödyntävä data-analytiikka voidaan puolestaan yhdistää skientometriikkaan signaalien havaitsemiseksi eri tietokannoista. Yhdistämällä eri menetelmiä voidaan muodostaa käsityksiä uusista teknologioista ja tehdä tietoon perustuvia päätöksiä niihin panostamisesta ja käyttöönotosta.

Kattava julkaisu teknologioiden ja kriittisten raaka-aineiden toimitusriskeistä on esimerkiksi Carrara ym. (2023), joka esittelee systemaattisen ja yksityiskohtaisen ennakkoinnin 15 keskeisen teknologian toimitusketjuista viidellä strategisella sektorilla (uusiutuva energia, sähköinen liikkuminen, energiantensiivinen teollisuus, digitaaliala sekä ilmailu-, avaruus- ja puolustusala). Ketjut ulottuvat raaka-aineista ja jalostetuista materiaaleista komponentteihin, kokoonpanoihin, superkokoonpanoihin ja järjestelmiin.

Kysynnän kehitystä voidaan arvioida erilaisilla skenaarioilla. Korkean kysynnän skenaario (*High Demand Scenario*, HDS) johtaa jonkin tietyn materiaalin kysynnän jyrkkään kasvuun, koska oletuksena on uuden teknologian nopea käyttöönotto yhdistettynä suureen markkinaosuuteen ja materiaali-intensiteettiin.

Matalan kysynnän skenaariossa (*Low Demand Scenario*, LDS) uuden teknologian käyttöönotto on hidasta ja markkinaosuus sekä materiaali-intensiteetti pieniä. Tämä johtaa



Kuva 2. Mukaellen Carrara ym. (2023): Raaka-aineiden kysynnän ennakoitu määrä vuosille 2030 ja 2050 Euroopan unionissa korkean kysynnän (HDS) ja matalan kysynnän skenaarioissa (LDS). Raaka-aineiden kysyntä kasvaa kummassakin skenaariossa.

Figure 2. As per Carrara et al. (2023): Projected demand for raw materials in the European Union for 2030 and 2050 under the high demand (HDS) and low demand (LDS) scenarios. Demand for raw materials increases in both scenarios.

maltilisempaan kysynnän kasvuun kuin HDS. Joissakin tapauksissa kysyntä saattaa jopa laskea, mutta yleisesti ottaen kysynnän kasvu on oletuksena molemmissa skenaarioissa.

Teknologiaennakoinneista johdettuihin raaka-aineiden kysyntäennusteisiin tarvittavat parametrit ovat:

1) Teknologian käyttöönotto, joka kuvaa tarkasteltavan teknologian tulevaa kehitystä, joka on hahmotettavissa esimerkiksi skenaarioiden avulla tai markkinoiden kasvuvauhdin kautta. Vuosittainen kapasiteetin käyttöönotto tai vuosittainen myynti ovat olennaisia muuttujia materiaalien kysyn-

nän laskemiseksi. Näiden muuttujien määrittämiseksi tarvitaan täydentäviä tietoja tuotteen elinkaaresta.

- 2) **Aliteknologian markkinaosuudet**, jotka kuvaavat sitä, että jokaisella teknologialla voi olla hyvin erilaisia kokoonpanoja tai malleja, joille voi olla ominaista erityiset materiaalivaatimukset. Arviot tulevasta teknologiavalikoimasta ovat olennaisia raaka-aineiden kysyntäskenaarioiden kehittämiseksi.
- 3) **Materiaali-intensiteetti ja -tehokkuus** osoittavat tarvittavan materiaalin määrän käytettyä teknologiayksikköä kohden.

Kriittisten raaka-aineiden kysynnän ennakoidaan kummassakin Carrara ym. (2023) esittämässä skenaariossa kasvavan merkittävästi EU:ssa (kuva 2). LDS-skenaariossa esimerkiksi litiumin ja grafitin kysyntä EU:ssa vuonna 2050 on noin 14- ja 18-kertainen vuoden 2020 kulutukseen verrattuna, kun taas alumiinin ja kuparin osalta se on noin nelin- ja viisin-kertainen vuoden 2020 kulutukseen nähden.

HDS-skenaariossa EU:n kysynnän ennustetaan kasvavan vuoteen 2050 mennessä kaikilla tutkituilla sektoreilla. Raaka-aineiden, kuten nikkelin, litiumin ja grafitin, kysynnän ennustetaan kasvavan 16-, 21- ja 26-kertaisiksi nykyisiin arvoihin verrattuna.

Resursseista käydään myös toimialoittaista kilpailua: harvinaisia maametalleja ei käytetä ainoastaan tuuliturbinieneraattoreissa, vaan myös muissa keskeisissä kasvavien markkinoiden teknologioissa, kuten erilaisissa digitaalisissa järjestelmissä tai sähköajoneuvojen moottoreissa.

Teknologiaennakointiin verrattuna toimitusketjujen ennakointi on enemmänkin toimitusriskien hallintaa johtuen EU:n riippuvuudesta muista maailman maista. Toimitusketjuriskit ovat yksi hankalimmista hallita. Niihin vaikuttaa niin geopolitiikka, äärimmäiset sääilmiöt, globaalitalous kuin sääntely, ja nämä kaikki ovat yhä tiiviimmin kytköksissä

toisiinsa. Toimitusriskit eivät uhkaa ainoastaan EU:n energiamurrosta, vaan niillä on myös laajempia taloudellisia ja sosiaalisia vaikutuksia, kuten puhtaan energian teknologioiden kustannusten mahdollinen nousu ja siirtymän kielteiset työllisyysvaikutukset.

Toimitusriskien ennakointianalyysijä tehdään sekä materiaaliakohtaisesti että maakoh- taisesti (esimerkkinä platinametallit, Georgitzikis ym. 2023). Analyysissä mallinnetaan toimitusketju ja tarkastellaan sen kaikkia osia erikseen.

Toimitusketjun eri vaiheiden mahdollisia pullonkauloja arvioidaan toimitusriskin ja tulevan kysynnän kannalta merkityksellisten skenaarioiden tai markkinatrendien perusteella. Toimitusriskien ennustaminen edellyttää toimitusketjun mahdollisten häiriöiden ja epävarmuustekijöiden tunnistamista ja arviointia. Keskeisiä riskejä ovat kysynnän vaihtelu, markkinoiden epävakaus, geopolittiset tapahtumat, toimittajien epäluotettavuus ja monimutkaiset globaalit toimitusverkostot.

Nykyiset analyysit sisältävät 2020-luvulla käynnistymään suunnitellut kaivosprojektit, toimivien kaivosten viimeaikaiset ja ennakoit- dut laajennukset, suunnitellut kaivosten sulke- miset ja uudelleenkäynnistykset, hyllytetyt tai lykätty projektit sekä perusmetallien louhin- nan sivutuotteina syntyvän raaka-aineen. Li- säksi tarvittaessa otetaan huomioon malmien metallipitoisuuksien asteittainen heikkenemi- nen ja sähkönjakeluhäiriöiden vaikutus tuo- tantoon. Ennakointianalyysissä otetaan huo- mioon myös jalostamattomien varastojen käsittely ja markkinoille saattaminen. Lisäksi kaivoksiin ja kaivosprojekteihin kohdistuvien pakotteiden vaikutus otetaan huomioon niiden aikaansaamien logististen ja taloudellisten haas- teiden vuoksi. Tuotannolle ei oleteta rajoituksia infrastruktuurin ja sulatuskapasiteetin osalta.

Pitkän aikavälin tavoitteena toimitusris- kien osalta on myös ehdottaa ratkaisuja kriit- tisten raaka-aineiden käytön vähentämiseksi tai korvaamiseksi keskeisissä teknologioissa.

Lopuksi

Raaka-aineiden kysynnän ja riskien ennakointi kohtaa maailman, jota leimaa kasvava turbulenssi, epävarmuus, murrokset ja monimutkaisuus. Jokaisella analysoidulla toimitusketjulla on omat ongelmansa, jotka vaativat räätälöityjä ratkaisuja lyhyen ja pitkän aikavälin toimivuuden vahvistamiseksi ja vaikeuttavat riskien arviointia strategisia päätöksiä tehtäessä tai pitkän aikavälin suunnittelussa. Kaikille kriittisille raaka-aineille ei myöskään sovi sama malli riippuvuuden pienentämiseksi.

Mahdollisimman tarkka tieto ja kattava ennakointi – kuten tulevaisuusskenaarioiden käyttö stressitesteinä – auttavat valinnoissa ja pitkän aikavälin toimenpiteiden priorisoinnissa. Ennakointimenetelmät tarjoavat mahdollisuuden tarkastella riskejä, jotka saattavat olla perinteisten kvantitatiivisten ja kvalitatiivisten riskinarviointimenetelmien tavoittamattomissa.

FT PIRJO-LEENA FORSSTRÖM
(pirjo-leena.forsstrom@csc.fi)

TT AMANDA EKLUND
(amanda.e.a.eklund@outlook.com)

Pirjo-Leena Forsström on filosofian tohtori geotieteiden alalta, ja toimii johtajana Tieteen tietotekniikan keskus CSC:ssä. Hän on täydentänyt koulutustaan ennakoinnin, systeemianalyysin, riskien hallinnan ja kestäväystutkimuksen opinnoilla ja osallistuu mm. Yhteiskunnan turvallisuus -standardointiryhmään. Amanda Eklund on tekniikan tohtori, joka on väitellyt materiaalitieteistä, keskittyen erityisesti ärsykkeisiin reagoiviin polymeerimateriaaleihin. Hän on myös kouluttautunut vihreään siirtymään ja ilmastomuutokseen liittyvistä teemoista.

Summary

Tools for evaluating the criticality of raw materials

Natural resources are under increasing pressure due to their economic importance and growing usage. Some raw materials are deemed critical based on a combination of their economic and strategic importance and supply risks. The criticality varies temporally and depends on several parameters. Defining the exact status of criticality is demanding. As a society, we also need to predict the future criticality. Foresight analysis provides scenarios to appraise the demand for a specific raw material. Supply risk analysis helps in determining the availability of the raw material in question.

Lähdeluettelo

- Blengini, G. A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V. ym., 2017. Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 158 s.
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., ym., 2023. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 261 s.
- Elsner, M., Atkinson, G. & Zahidi, S., 2025. Global Risks Report 2025. World Economic Forum, 104 s.
- European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Pennington, D., Tzimas, E., ym., 2017. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials – Guidelines. Publications Office, Luxembourg, 25 s.
- European Commission, Secretariat-General, 2023. Strategic Foresight Report – Sustainability and people's wellbeing at the heart of Europe's Open Strategic Autonomy. COM/2023/376, 35 s.
- European Commission: Joint Research Centre, Eulaerts, O., Grabowska, M. and Bergamini, M.,

2025. Weak signals in Science and Technologies 2024, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/6571994, JRC140959>.
- Farinha, J., Vesnic Alujevic, L. & Hristova, M. A., 2023. Identifying future critical technologies for space, defence and related civil industries. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 56 s.
- Geologian tutkimuskeskus, 2025. Kriittiset ja strategiset raaka-aineet. <https://www.gtk.fi/ajankohtaista/kriittiset-ja-strategiset-raaka-aineet/> [27.8.2025].
- Georgitzikis, K., 2024. Data collection for the Raw Materials Information System (RMIS). Publications Office of the European Union, Luxembourg, 29 s.
- Georgitzikis, K., Eynard, U., Bobba, S., Perpetuo Coelho, F., Ingoglia, D. & Garbossa, E., 2023. Platinum: Impact assessment for supply security. European Commission, 8 s.
- Grohol, M. & Veeh, C., 2023. Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union, 152 s.
- Ierides, M., Nohl, L., Alves Dias, P., Nohl, M., Blagoeva, D., ym., 2025. Substitution and reduction of critical and strategic raw materials in clean energy technologies – An overview of solutions using advanced materials. Publications Office of the European Union, 66 s.
- OECD, 2019. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD Publishing, Paris, 210 s.
- Valtioneuvosto, 2025. Tulevaisuustyö ja ennakointi. www.valtioneuvosto.fi/tulevaisuustyö-ja-ennakointi [28.8.2025].

Kriittisesti kriittisistä raaka-aineista

JUSSI S. HEINONEN JA ELINA LEHTONEN

Euroopan komission määritelmän mukaan kriittiset raaka-aineet (*Critical Raw Materials*, CRM) ovat raaka-aineita, joilla on suuri taloudellinen merkitys ja joiden saatavuuteen liittyy merkittävä riski. Ne ovat keskeisiä nykyaikaisen teknologian ja teollisuuden kannalta, ja niitä tarvitaan muun muassa uusiutuvan energian tuotannossa, sähköajoneuvoissa, elektroniikassa ja puolustusteollisuudessa. EU:n vuoden 2023 listalla on 34 kriittistä raaka-ainetta, joskin todellisuudessa yksittäisten alkuaineiden määrä on suurempi, sillä osa, kuten platinaryhmän metallit, on niputettu listassa yhteen ryhmään (European Commission 2023). Tästäkin Geologi-lehden numerosta käy ilmi, että kallioperässämme on potentiaalia uusien esiintymien löytämiseen.

Kriittisten raaka-aineiden tarve liitetään usein kestäväan kehitykseen ja ”vihreään siirtymään”, mutta niiden käyttö ei rajoitu pelkästään välttämättömiin tai hyödyllisiin tarkoituksiin. Esimerkkinä tästä on valtavia määriä energiaa ja raaka-aineita kuluttava kryptovaluuttalouhinta. Kryptovaluutat ovat

spekulatiivista digitaalista varallisuutta ilman konkreettista arvoa. Pelkästään kryptovaluutta Bitcoinin louninnan on arvioitu viime vuosina kuluttaneen saman verran energiaa kuin Ruotsi tai Puola eli noin 0,4–0,6 prosenttia globaalista energiankulutuksesta (Delahaye 2024). Trendi on kasvamaan päin.

Tekoälyn energiankulutuksen on arvioitu ylittävän Bitcoinin energiankulutuksen vuoden 2025 loppuun mennessä (de Vries-Gao 2025, ks. myös Chen 2025). Vaikka tekoälystä voi olla paljon hyötyä, monet sovellukset, kuten Google, käyttävät sitä oletuspalveluna usein hyödyttömin ja harhaanjohtavin tuloksin (Williams 2024). Lisäksi käyttäjät tuottavat sillä runsaasti merkityksetöntä sisältöä, jota voisi kutsua digitaalseksi jätteeksi (kuva 1).

Kryptovaluuttalouhimoiden tehokkaat tietokoneet ja tekoälyn tarvitsemat datakeskukset syövät enenevässä määrin kriittisiä raaka-aineita, kuten kuparia, kobolttia ja harvinaisia maametalleja. Geologien etsimiä harvinaisia ja arvokkaita luonnonvaroja pää-