

**TIEDEISKU KRIITTISTEN
RAAKA-AINEIDEN
KIERTOTALOUESTA**

Loputon kierto

raaka-aineet, joita
ei ole varaa hukata



**SUOMALAINEN
TIEDEAKATEMIA**



SUOMALAINEN TIEDEAKATEMIA
FINNISH ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS
ACADEMIA SCIENTIARUM FENNICA

TIEDEISKU on tutkijoiden asiantuntemukseen perustuva tilannekuva ilmiöstä ja sen yhteiskunnallisesta merkityksestä päätöksentekijöitä varten.

Tämä tiedeisku on laadittu Jane ja Aatos Erkon säätiön rahoittamassa Tieteelliset ilmiökartat -hankkeessa Suomalaisessa Tiedeakatemiassa. Sisällön toimittamisesta vastasi **Antti Kailio**. Tietokoosteen tieteellisenä neuvonantajana toimi professori **Riitta Keiski** (Oulun yliopisto).

Tiedeiskun sisällöt perustuvat seuraavien tutkijoiden kanssa käytyihin keskusteluihin ja heille tehtyihin kyselyihin:

JYRI HANSKI

Teknologian tutkimuskeskus VTT

TOMMI KAUPPILA

Geologian tutkimuskeskus GTK

MINTTU LAUKKANEN

LUT-kauppakorkeakoulu

TOPI TURUNEN

Suomen ympäristökeskus

ARI VÄISÄNEN

Jyväskylän yliopisto

Lopun lähdeluettelossa listatut lähteet on hankittu tutkijoille lähetetyllä kirjallisella kyselyllä.

Tiedeisku on julkaistu maaliskuussa 2025 ja sisällöt perustuvat sen hetkiseen tilanteeseen.

Taitto: Eveliina Sillanpää

Paino: Picaset

Valokuvat: Chemical Elements – A Virtual Museum / images-of-elements.com



JANE JA AATOS
ERKON SÄÄTIÖ

Johdanto

Vihreä siirtymä, digitalisaatio ja huoltovarmuus ovat EU:n keskeisiä strategisia painopisteitä. Näiden toteuttaminen vaatii kriittisiä raaka-aineita. Ne ovat maaperästä kaivettavia metalleja ja mineraaleja, joille on suuri kysyntä ja joiden saatavuuteen liittyy merkittäviä riskejä.

Kriittiset raaka-aineet ovat uusiutumattomia luonnonvaroja, joiden louhiminen on kallista, hankalaa ja ympäristöä kuormittavaa. Näistä syistä kaivostoiminnan rinnalle tarvitaan kriittisten raaka-aineiden kiertotaloutta.

Kiertotalouden toteuttaminen vaatii kunnianhimoista uudistumista koko arvoketjussa tuotesuunnittelusta kierrätykseen. Päättäjiltä edellytetään määrätietoisia toimia, jotka tukevat muutosta kohti kestävää ja kohtuullista raaka-aineiden käyttöä.

Kiertotalous on vahvasti esillä myös Suomen kansallisessa mineraalistrategiassa. Strategian visiossa Suomi on mineraalien kestävä ja vastuullisen hyödyntämisen globaali edelläkävijä, kumppani ja kehittäjä.

Tämä tiedeisku tarjoaa tutkimustietoon ja suomalaisten tutkijoiden arvioihin perustuvan tilannekuvan kriittisten raaka-aineiden kiertotaloudesta. Se kuvaa muutoksia, joita kiertotalouteen siirtyminen vaatii ja nostaa esiin Suomen erityispiirteet kriittisten raaka-aineiden kiertotaloudessa.

Tiedeisku on koostettu haastatteleamalla viittä aihepiiriin perehtynyttä suomalaista tutkijaa. Haastattelujen lisäksi tutkijat vastasivat kirjalliseen kyselyyn, johon he vastasivat tutkimustiedon perusteella. Lähdeviitatut tiedot pohjautuvat kirjalliseen kyselyyn. Ne tiedot, joissa ei ole lähdeviitteitä, perustuvat tutkijoiden haastatteluissa esittämiin asiantuntija-arvioihin.

SISÄLTÖ

**MIKÄ TEKEE RAAKA-
AINEISTA KRIITTISIÄ?**
S. 4

**MITÄ KIERTOTALOUS
VAATII?**
S. 7

**SUOMESTAKO
SUUNNANNÄYTTÄJÄ?**
S. 9

**MITEN
KIERTOTALOUDEN
HAASTEET
RATKAISTAAN?**
S. 11

RATKAISUJEN AVAIMIA
S. 14

LÄHTEET
S. 15

MIKÄ TEKEE RAAKA-AINEISTA KRIITTISIÄ?

Kriittiset raaka-aineet ovat materiaaleja, joilla on EU:lle suuri taloudellinen merkitys ja joihin liittyy suuri toimitushäiriöiden riski. Kriittisyys johtuu raaka-aineiden suuresta kysynnästä, lähteiden keskittymisestä yksittäisille unionin ulkopuolisille valtioille sekä hyvien ja kohtuuhintaisten vaihtoehtoisten raaka-aineiden puutteesta.

Kiinalla on merkittävä rooli kriittisten raaka-aineiden, erityisesti harvinaisten maametallien, arvoketjuissa.^{1,2} Yli 90 % harvinaisten maametallien tunnetuista esiintymistä on Kiinan omistuksessa. Kysynnän kasvaessa metallien saatavuudesta voi muodostua huomattava poliittinen ongelma.³

Tällä hetkellä EU on määritellyt kriittisiksi yhteensä 34 raaka-ainetta. Niistä 17 on luokiteltu myös *strategiseksi raaka-aineeksi*, joiden globaalin tarjonnan ja kysynnän välillä on merkittävä ero ja tuotannon lisääminen on haastavaa.

EU antoi huhtikuussa 2024 kriittisiä raaka-aineita koskevan asetuksen.⁴ Sen tarkoituksena on huolehtia, että EU:lla on käytössään riittävästi raaka-aineita omiin tarpeisiinsa. Tämä vaatii nykyistä monipuolisempia toimitusketjuja, vahvempaa kiertotaloutta, tehokkaampaa resurssien käyttöä ja korvaavien raaka-aineiden kehittämistä.

EU:lla on kunnianhimoiset tavoitteet raaka-ainetuotantoon

Asetuksessa asetetaan tavoitteeksi, että vuonna 2030 vähintään 10 prosenttia EU:n vuotuisesta kriittisten raaka-aineiden kulutuksesta on peräisin louhinnasta EU:ssa, 40 prosenttia jalostuksesta EU:ssa ja 25 prosenttia kierrätyksestä EU:ssa. Lisäksi enintään 65 prosenttia kunkin strategisen raaka-aineen vuotuisesta kulutuksesta EU:ssa voi perustua tuontiin yhdestä kolmannelle maasta.

EU:n tavoitteet vuoteen 2030 mennessä

10 %

EU:n vuotuisesta kriittisten raaka-aineiden kulutuksesta on peräisin louhinnasta EU:ssa,

40 %
jalostuksesta
EU:ssa

ja

25 %
kierrätyksestä
EU:ssa.

Lisäksi enintään

65 %

kunkin strategisen raaka-aineen vuotuisesta kulutuksesta EU:ssa voi perustua tuontiin yhdestä kolmannelle maasta.

Kiertotalouden kannalta oleellista kierrätystavoitetta voi pitää erityisen kunnianhimoisena. Raaka-ainekohtaisesti tarkasteltuna kierrätystavoite ylittyy tällä hetkellä vain alumiinin, antimonin, kuparin ja volframin kohdalla.⁵

Oleellinen keino tavoitteiden saavuttamiseksi on myöntää kriittisten raaka-aineiden tuotantoon liittyville hankkeille lupamenettelyä helpottava strategisen hankkeen status. Pääsääntöisesti strategisten louhintahankkeiden lupamenettely saa kestää enintään 27 kuukautta ja kierrätys- ja jalostushankkeiden 15 kuukautta.⁶

Kriittisten raaka-aineiden asetus myös velvoittaa kaivosyhtiöt tutkimaan, löytyykö kaivosjätteistä sellaisia määriä kriittisiä raaka-aineita, että ne kannattaisi hyödyntää. Alustavien arvioiden mukaan Suomen kaivannaisjätealueilta voisi olla hyödynnettävissä esimerkiksi 22 000 tonnia kobolttia, 93 000 tonnia nikkeliä ja 103 tonnia kuparia.⁷

1 IEA (2023)

2 IEA (2024)

3 Binnemans ym. (2015)

4 EU:n kriittisiä raaka-aineita koskeva säädös EU:n tulevien toimitusketjujen tueksi www.consilium.europa.eu/fi/infographics/critical-raw-materials/

5 IEEP (2023)

6 Strateginen riippumattomuus: neuvosto hyväksyi lopullisesti kriittisiä raaka-aineita koskevan säädöksen www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2024/03/18/strategic-autonomy-council-gives-its-final-approval-on-the-critical-raw-materials-act/

7 Työ- ja elinkeinoministeriö (2024b)

Kriittiset raaka-aineet

Raaka-aine	Esimerkki käyttökohteesta	EU:n omavaraisuusaste (% kokonais- kulutuksesta)	Kierrätetyn raaka- aineen käyttöosuus (% EU:n kokonaiskulutuksesta)
alumiini/bauksiitti	kevyet rakenteet	11%	32%
antimoni	palonsuoja-aineet	0%	28%
arseeni	puolijohteet	61%	0%
baryytti	röntgenkuvauksen varjoaineet	26%	0%
beryllium	elektroniikka	(tietoa ei saatavilla)	0%
boori/boraatti	lasikuitu	0%	1%
fluorisälpä	metallien valmistus	40%	1%
fosfori	kemian- ja puolustusteollisuus	0%	0%
gallium	puolijohteet	2%	0%
germanium	infrapunalaitteet	58%	2%
grafitti	akut	1%	3%
hafnium	ydinreaktorien säätösauvat	100%	0%
harvinaiset maametallit (kevyet)	kestomagneetit	0%	3%
harvinaiset maametallit (raskaat)	kestomagneetit	0%	4%
helium	suojavaasut	6%	2%
koboltti	akut	19%	22%
koksihiili	terästeollisuus	34%	0%
kupari	sähkökaapelit	52%	55%
litium	akut	0%	0%
maasälpä	lasi	46%	1%
magnesium	kevyet metalliseokset	0%	13%
mangaani	terästeollisuus	4%	9%
nikkeli	akut	25%	16%
niobium	erikoisluja teräs	0%	0%
piimetalli	puolijohteet	40%	0%
platinaryhmän metallit	poltto- ja katalyyttit	0%	10%
raakafosfaatti	lannoitteet	18%	17%
skandium	kiinteäoksidipoltto- ja katalyyttit	0%	0%
strontium	keraamiset magneetit	100%	0%
tantaali	elektroniset komponentit	1%	0%
titaanimetalli	kevyet ja vahvat metalliseokset	0%	19%
vanadiini	vahvat metalliseokset	(tietoa ei saatavilla)	1%
vismutti	lääkkeet	29%	0%
volframi	metalliseokset	20%	42%

strateginen raaka-aine

Lähde: Institute for European Environmental Policy (2023)

Kaivannaisjätettä syntyy Suomessa

**90 miljoonaa
tonnia**

vuodessa, mikä on

75 %

**kaikesta Suomessa vuosittain
syntyvästä jättemassasta.**

Kriittiset raaka-aineet ovat tulevaisuuden raaka-aineita

Vihreä siirtymä muovaa EU:n taloutta. Kriittisiä raaka-aineita tarvitaan vihreälle siirtymälle olennaisen teknologian tuotannossa. Erityisesti harvinaisten maametallien kysynnän on ennustettu kasvavan tulevaisuudessa. Niitä käytetään sähköisessä liikenteessä, tuulivoimassa, robotiikassa, sähkömoottoreissa, valaisussa, sotateknologiassa ja digitalisaatiossa.⁸

Tyypilliseen sähköautoon tarvitaan noin kuusinkertainen määrä mineraaleja polttomoottoriautoon verrattuna. Maatuulivoimalan mineraalitarve on yhdeksänkertainen maakaasuvoimalaitokseen verrattuna.⁹

Digitalisaation myötä tallennettavan tiedon määrä tulee kasvamaan räjähdysmäisesti. Datakeskuksia tarvitaan huomattavasti enemmän, mikä lisää esimerkiksi harvinaisiin maametalleihin lukeutuvan neodyymin kysyntää.¹⁰ Kriittiset raaka-aineet ovat välttämättömiä myös elektroniikka- ja kemianteollisuudessa ja puolustusteknologian kehittämisessä.

Lopulta kyse on huoltovarmuudesta. Tulevaisuudessa olemme uusiutuvan energian varassa, joten kriittisillä raaka-aineilla turvataan energiansaanti.

Raaka-ainepula ei ratkea vain kaivamalla

Kriittisten raaka-aineiden asetuksen myötä EU pyrkii lisäämään omaa kaivostoimintaa. Esimerkiksi litiumprojekteja on tällä hetkellä käynnissä useita, esimerkiksi Suomessa Keski-Pohjanmaalla.¹¹ Fossiilisten polttoaineiden väistyessä kaivostoiminta tosin kokonaisuudessaan vähenee.¹²

Kaivostoiminnalla on aina vaikutuksia ympäristöönsä. Kaivokset vaikuttavat alueen ilmanlaatuun ja ilmastoon, maa- ja kallioperään, pinta- ja pohjavesiin, luonnonvarojen käyttöön, luonnonolosuhteisiin ja luonnon monimuotoisuuteen.¹³

Erityisesti sulfidisten metallimalmien louhinnasta voi päästä haitallisia aineita maaperään ja vesistöihin.¹⁴ Myös suljettujen kaivosten kaivannaisjätealueet voivat aiheuttaa päästöjä.¹⁵ Kaivannaisjätettä syntyy Suomessa 90 miljoonaa tonnia vuodessa, mikä on 75 prosenttia kaikesta Suomessa vuosittain syntyvästä jättemassasta.¹⁶

Kaivoshankkeilla on myös alueellisia sosiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia. Kaivokset luovat alueelle työpaikkoja, mutta ne ovat aina väliaikaisia. Erityisesti avolouhokset muokkaavat maisemaa pysyvästi. Kaivoksen aiheuttamat melu ja lisääntynyt liikenne vaikuttavat myös lähiympäristön viihtyvyyteen.

Erityisesti Pohjois-Suomessa saamelaisten kotiseutualueilla ja poronhoitoalueilla tulee taata saamelaisten oikeudet alkuperäiskansana. Viranomaisten tulee neuvotella kaivosmineraaleja sisältävän esiintymän etsinnästä ja hyödyntämisestä saamelaiskäräjien kanssa.¹⁷

Kaivostoiminnan lisääminen on hidasta, sillä malminetsintä ja lupaprosessit kestävät vuosia. Myös kaivosten ympäristövaikutukset ja sosiaalinen hyväksyttävyys vaikuttavat kaivosten perustamiseen. Lisäksi mineraaliesiintymien riittävyys vihreän siirtymän tarpeisiin on epävarmaa¹⁸. Kriittisten raaka-aineiden saatavuutta ei siis voida ratkaista pelkästään kaivostoimintaa lisäämällä.

Ilman kiertotaloutta EU:n on käytännössä mahdotonta päästä kriittisten raaka-aineiden asetuksen tavoitteisiin. Kaivostoimintaa tarvitaan joka tapauksessa, sillä kierto-taloudella on vaikea kattaa kaikkea kysyntää. Tavoitteena tulisi olla, että kaivostoimintaa tarvitaan mahdollisimman vähän.

8 Balaram (2019)
9 IEA (2021)
10 Euroopan komissio (2020)

11 S&P Global (2023)
12 Nijjens (2023)
13 Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2024)
14 Terveystieteiden tutkimuskeskus (2024)
15 Geologian tutkimuskeskus (2022)
16 Työ- ja elinkeinoministeriö (2024b)
17 Laki saamelaiskäräjistä (1995/974 § 9)
18 Michaux (2024)

MITÄ KIERTOTALOUS VAATII?

Kiertotalous on muutakin kuin kierrätystä

Kiertotalouden perimmäinen tavoite on louhimalla saatavien eli neitseellisten raaka-aineiden käytön vähentäminen. Tähän pyritään pidentämällä tuotteiden elinkaaria korjaamalla ja käyttämällä niitä uudelleen. Lopulta käytöstä poistuvat materiaalit kierrätetään takaisin uusien tuotteiden raaka-aineiksi.

Neitseellisten raaka-aineiden käyttöä voidaan vähentää myös esimerkiksi valmistamalla tuotteita vähemmillä komponenteilla, korvaamalla kriittisiä raaka-aineita toisilla raaka-aineilla ja yhteiskäyttöön perustuvilla toimintamalleilla.

Ennen kierrätystä on tärkeää selvittää, voisiko tuotteen elinkaarta pidentää esimerkiksi korjaamalla tai uusiokäytöllä. Esimerkiksi sähköauton vanhaa akkua voidaan hyödyntää energian varastoinnissa.

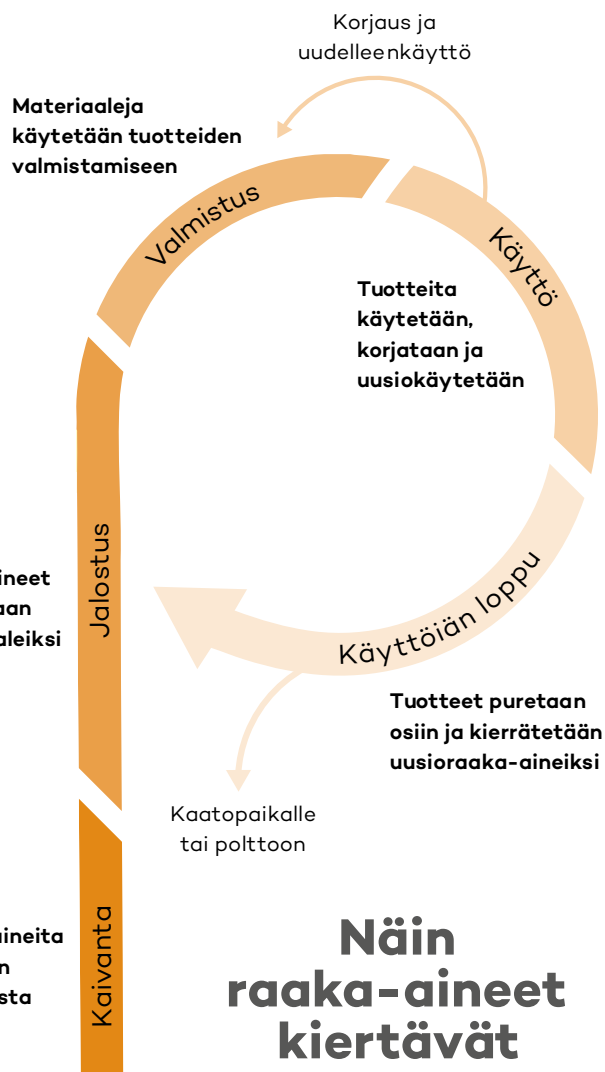
Kiertotalouden pitkän aikavälin hyötyjen mittaaminen on vaikeaa ja tarvittava teknologia edellyttää suuria investointeja.

Nykyinen lainsäädäntö ja teollisuuden vakiintuneet käytännöt pohjautuvat suurelta osin lineaariseen talousmalliin, jossa tuotteet valmistetaan, kulutetaan ja lopulta heitetään pois. Lisäksi haasteina ovat organisaatioiden syvälle juurtuneet toimintatavat sekä yhteistyön ja osaamisen puute läpi toimitusketjujen.¹

Kierrätyksen täytyy kannattaa

Esimerkiksi litiumioniakut, aurinkokennot ja sähkömoottorit sisältävät huomattavan suuren määrän kriittisiä raaka-aineita.^{2,3} Kriittisiä raaka-aineita voidaan kierrättää myös kaivosjätteistä, käytöstä poistetuista elektroniikkalaitteista ja rakennusjätteistä.

Kierrätyksen perusmenetelmiä ovat mekaaninen erottelu, lämpökäsittely ja kemialliset prosessit. Monet kierrätysprosessit muistuttavat raaka-aineiden jalostusta ja kierrätetty materiaali päätyykin usein samaan jatkokäsittelyyn kuin kaivoksista louhittu raaka-aine. Komponentteja



tai materiaaleja voi kierrättää myös sellaisenaan pilkkomatta niitä raaka-aineiksi.

Monet tehokkaat menetelmät kuluttavat paljon energiaa tai vaativat ympäristölle haitallisia kemikaaleja. Esimerkiksi liuotinuutto voi käytännössä erottaa mitä tahansa, mutta prosessi ei välttämättä ole taloudellisesti kannattava tai ympäristöystävällinen.⁴

Akkujen,^{5,6} piirikorttien^{7,8,9} ja kestopagneettien¹⁰ kierrätykseen on kehitetty uusia potentiaalisia menetelmiä. Kehittämisessä haasteena on löytää taloudellisesti kannattavia ja ympäristöystävällisiä ratkaisuja.

1 Tura ym. (2019)

2 Euroopan komissio (2020)

3 Euroopan komissio (2023)

4 Perez ym. (2019)

5 Perämäki ym. (2022)

6 Porvali ym. (2020)

7 Lahtinen ym. (2018)

8 Koskinen ym. (2024)

9 Rajahalme ym. (2022)

10 Niskanen ym. (2022)

Kiertotalous lähtee suunnittelusta

Tuotesuunnittelulla on merkittävä vaikutus kriittisten raaka-aineiden kiertotalouteen.^{11, 12}

Tuotteet tulisi suunnitella kestävästi käyttäen mahdollisimman pitkään.

Helposti purettaviksi suunniteltuja tuotteita on helppo korjata ja kierrättää.

Kiertotalouden mukaisen suunnittelun¹³ ansiosta on mahdollista vähentää tiettyjen kriittisten raaka-aineiden kysyntää sekä parantaa niiden päättymistä kierrätykseen. Suunnitelmalla tuote kierrätettäväksi voidaan myös tehdä raaka-aineiden talteenotosta helpompaa, halvempaa ja ympäristöystävällisempää.¹⁴

EU:n ekosuunnitteluasetuksen nojalla voidaan asettaa tarkkoja vaatimuksia tuotteiden kestävyydelle, korjattavuudelle, energiatehokkuudelle ja kierrätettävyydelle tuoteryhmäkohtaisesti.¹⁵

Kiertotalous kaivoksissa

Kaivoksissa kiertotalous tarkoittaa esimerkiksi prosessiveden kierrätystä kaivoksen sisällä. Prosessiveteen liuenneita metalleja voidaan ottaa talteen hyötykäyttöä varten.

Kaivokset kannattaisi suunnitella niin, että päätuotteen lisäksi sivutuotteena saatavat raaka-aineet otettaisiin talteen louhittua malmia prosessoitaessa. Sivutuotteena syntyvät raaka-aineet päätyisivät niitä hyödyntäville yrityksille eivätkä jätekasoiksi kaivosalueelle. Kaikkien raaka-aineiden hyödyntäminen parantaisi kaivoksen kokonaiskannattavuutta, mutta vaatii uudenlaista yritysyhteistyötä, johon ei ole totuttu.

11 Anastas & Zimmerman (2003)

12 Lee & Bony (2007)

13 Kivikytö-Reponen ym. (2022)

14 Kivikytö-Reponen ym. (2023)

15 Turunen & Suikkanen (2024)

SUOMESTAKO SUUNNANNÄYTTÄJÄ?

Suomen vahvuudet

Kansallisessa mineraalistrategiassa visioidaan, että vuonna 2040 ”Suomi on mineraalien kestävä ja vastuullisen hyödyntämisen globaali edelläkävijä, kumppani ja kehittäjä”.¹

Kiertotalouden osalta strategia painottaa erityisesti kannustimien suunnittelua parhaiden kiertotalousratkaisujen käyttöönottoon. Osa strategiaa on myös toteuttaa työ- ja elinkeinoministeriön aiemmin tunnistamia kaivannaisjätteiden kiertotaloutta edistäviä toimenpiteitä.²

Suomi on Euroopan mittakaavassa merkittävä kaivosmaa ja metallinjalostaja. Lisäksi maassamme on materiaaleja käyttävää teollisuutta sekä alan tutkimusta ja koulutusta. Potentiaalisia malmiesiintymiä on paljon ja niistä on hyvät tietoaaineistot. Tarvittavaa infrastruktuuriakin löytyy. Erityisesti nikkelin, koboltin, kuparin ja fosforin tuotantoketjut ovat vahvoja.

Jalostusosaamista tarvitaan raaka-aineiden kierrätyksessä, sillä sekin on aineiden prosessointia. Kaivos- ja jalostusosaamisesta on hyötyä erityisesti raaka-ainetasolle menevässä kierrätyksessä.

Samoihin metallinjalostamoihin voi mennä käsiteltäväksi sekä kaivoksesta tulevaa että kierrätettyä raaka-ainetta. Esimerkiksi nikkeliä prosessoidaan Suomessa tällä tavoin.

Suomessa uusissa kaivosprojekteissa pyritään huomioimaan maankäyttö, luonnon monimuotoisuus, energiatehokkuus ja käytetyt energiamuodot. Suomessa on myös ollut saatavilla rahoitusta raaka-aineiden kierrätyksen vaatiman teknologian kehittämiseen.

Suomen tulevaisuuden potentiaali

Akkujen kiertotalouden mukaista arvoketjua rakennetaan Euroopassa ja Suomi on tässä mukana. Harjavallassa toimii jo nyt Euroopan mittakaavassa merkittävä akkumateriaalien kierrätyslaitos. Tällaista kriittisten raaka-aineiden kierrätyskapasiteettia on koko EU:ssa varsin rajallisesti.

Suomessa myös tutkitaan kriittisten raaka-aineiden kierrätystä paljon. Jyväskylän yliopistossa (JYU) on kehitetty menetelmä kestopagneettien sisältämän neodyymin talteenottoon.³ Suomen ympäristökeskuksen ja JYU:n yhteishankkeessa tutkitaan sähköpotkulautojen sisältämien kriittisten raaka-aineiden kierrätystä. Teknologian tutkimuskeskus VTT:n pilottihankkeissa kehitetään esimerkiksi magneettien suorakierrätystä.

Suomessa voisi syntyä myös uusia innovaatioita yhdistämällä metsäteollisuuden ja mineraaliteollisuuden materiaalivirtoja. Metsä- ja paperiteollisuudesta voi myös löytyä sopivia osajia kiertotaloudelliseen kaivostoimintaan.

3 Jyväskylän yliopisto (2023)

Suomen kehitystarpeet

Harvinaisten maametallien tuotanto, teknologia ja osaaminen on vahvasti keskittynyt Kiinaan. Näitä strategisia raaka-aineita ei ole aiemmin juuri kaivettu Euroopassa, joten jalostuskapasiteettiakaan ei ole.

Jos Pohjois-Suomeen ja -Ruotsiin perustetaan harvinaisia maametalleja louhivia kaivoksia, tarvitaan myös metallinjalostamoja. Eurooppalaisen harvinaisten maametallien jalostuksen saaminen jaloilleen vaatii siis investointeja.

Suomen kaivostoiminnassa on kiinnostusta kiertotalousratkaisuihin, kuten sivuvirtojen hyödyntämiseen ja jätevesien käsittelyyn. Sivuvirtoja ei kuitenkaan vielä hyödynnetä kovin paljon.⁴ Maastamme löytyy potentiaalisia hyödyntämiskohteita.⁵

4 GTK (2023)

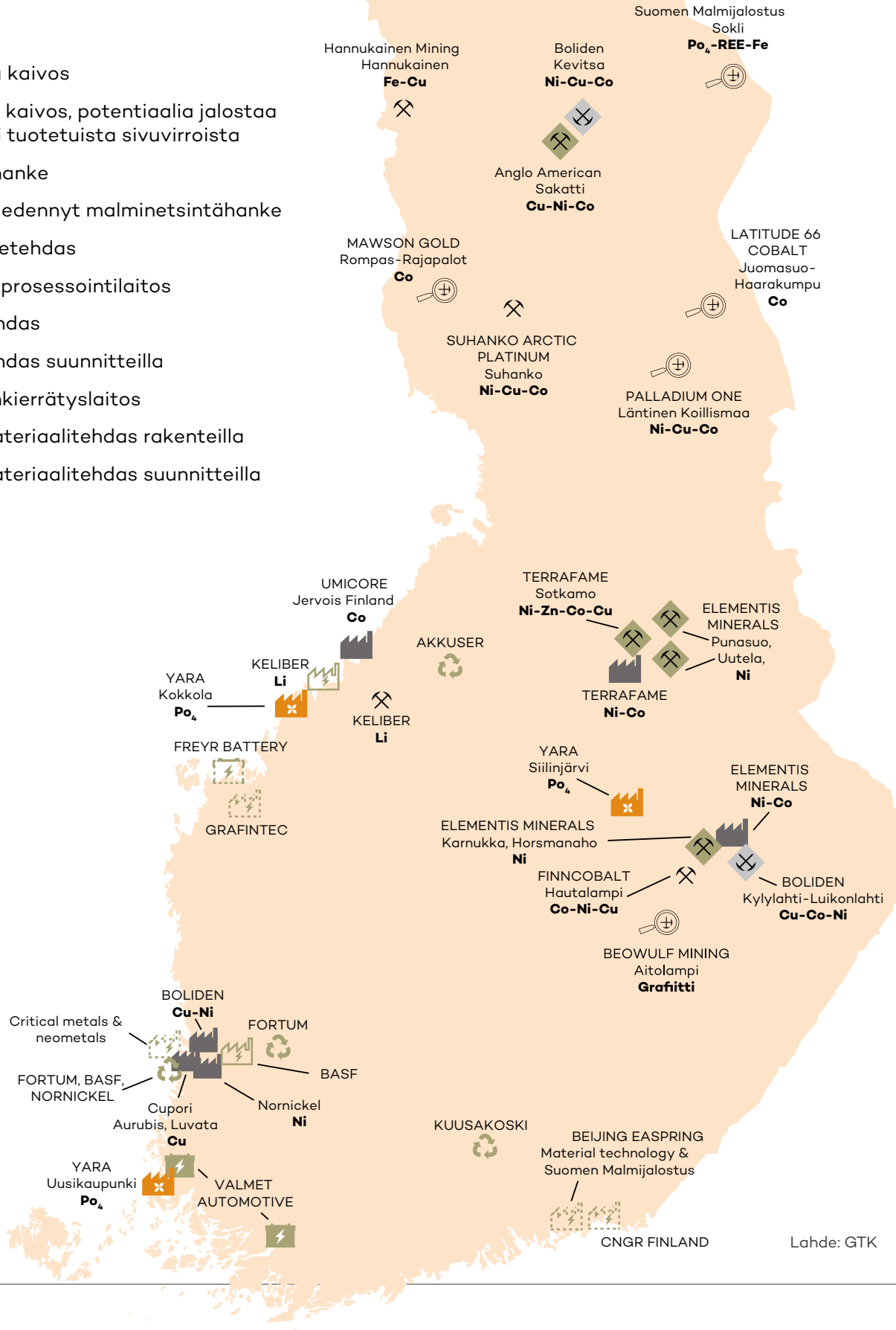
5 Kinnunen ym. (2022)

1 Työ- ja elinkeinoministeriö (2024b)

2 Työ- ja elinkeinoministeriö (2024a)

Suomen tärkeimmät kriittisten raaka-aineiden kaivokset ja prosessointilaitokset

-  Toimiva kaivos
-  Suljettu kaivos, potentiaalia jalostaa Co ja Ni tuotetuista sivuvirroista
-  Kaivoshanke
-  Pitkälle edennyt malminetsintähanke
-  Lannoitetehtas
-  Metallinprosessointilaitos
-  Akkutehtas
-  Akkutehtas suunnitteilla
-  Akkujenkierrätyslaitos
-  Akkumateriaalitehtas rakenteilla
-  Akkumateriaalitehtas suunnitteilla



Lahde: GTK

MITEN KIERTOTALOUDEN HAASTEET RATKAISTAAN?

Teknologiset haasteet ja ratkaisut

Haaste: Nykyinen tuotesuunnittelu vaikeuttaa kierrättämistä, sillä tuotteista on vaikea tunnistaa ja erottaa kriittisiä raaka-aineita sisältäviä osia.



Ratkaisu: Tuotesuunnittelulla ja standardoinnilla voitaisiin parantaa tuotteiden huollettavuutta, korjattavuutta, päivitettävyyttä ja kierrätettävyyttä. Ekosuunnitteluasetus mahdollistaa tähän kannustavan sääntelyn. EU:n kriittisten raaka-aineiden asetuksen edellyttämä merkintä laitteen sisältämästä kestopagneetista helpottaa kierrättämistä.

Haaste: Kierrätettävän materiaalin raaka-aineista ja niiden laadusta ei useinkaan ole riittävästi tietoa.^{1, 2, 3}



Ratkaisu: Digitaaliseen tuotepassiin voi tallentaa tietoja tuotteiden sisältämisestä kriittisistä raaka-aineista.⁴ Tiedot edistävät tuotteiden kierrätystä, käyttöiän pidentämistä ja tuotesuunnittelua. Akuissa tulee EU:n akkuasetuksen mukaan olla tuotepassi.

Haaste: Nykyiset metallien talteenotto-prosessit eivät kykene käsittelemään koostumukseltaan vaihtelevaa syötemateriaalia. Seosmateriaalien erottelu voi olla teknisesti hankalaa, sillä kierrätysprosessissa jokin seoksen raaka-aineista voi tuhoutua.



Ratkaisu: Kaikkea materiaalia ei tarvitse käsitellä takaisin raaka-aineiksi, vaan seosmateriaaleja voidaan kierrättää myös sellaisenaan. Esimerkiksi terästä voidaan kierrättää pilkkomatta sitä raaka-aineiksi.



Ratkaisu: Uusien talteenottomenetelmien kehittäminen kaupalliselle tasolle vaatii pilotointia ja testaamista. EU:n verkosto-organisaatio EIT RawMaterials tukee tällaista kehitystyötä rahoittamalla kansainvälisiä hankkeita, joissa teolliset toimijat testaavat potentiaalisia kierrätysmenetelmiä.

Haaste: Erityisesti harvinaisten maametallien kierrättäminen on vaikeaa eikä Euroopassa juuri ole kapasiteettia siihen.



Ratkaisu: Kierrätyskapasiteettia tulee kasvattaa. Kriittisten raaka-aineiden asetuksen mukaan kierrätyslaitokset voivat saada lupamenettelyjä nopeuttavan strategisen hankkeen statuksen. Jyväskylän yliopistossa on vastikään kehitetty menetelmä, jolla kestopagneettien sisältämä neodyymi saadaan otettua talteen.



Ratkaisu: Kestomagneettien materiaalia voidaan kierrättää myös suoraan ilman, että kestopagneetteista otettaisiin talteen yksittäisiä raaka-aineita.

39 IIEP (2023)
40 Karali & Shah (2022)
41 Baldassarre (2025)
42 EU (2024)

Haaste: Kierrätyslaitosten perustaminen ei välttämättä ole tällä hetkellä kannattavaa, koska kierrätettäväksi kelpaavaa raaka-ainetta ei ole riittävästi tarjolla. Kierrätyskapasiteettia tulisi kuitenkin olla valmiina, kun käytöstä poistuvien akkujen sekä aurinko- ja tuulivoimaloiden määrä lisääntyy lähivuosina.

➡ **Ratkaisu:** Tulevaisuuden kierrätystarpeisiin varautumiseksi tarvitaan taloudellisia kannustimia, kuten investointitukea tai verohelpotuksia kierrätyskapasiteetin rakentamiseen.

➡ **Ratkaisu:** Jokaisella EU-jäsenvaltiolla ei tarvitse olla omia kierrätyslaitoksia. Esimerkiksi Suomessa ei välttämättä synny riittävästi elektroniikkajätettä taloudellisesti kannattavan kierrätyslaitoksen tarpeisiin. Useiden maiden jätteet voisi keskittää yhteen suuren kapasiteetin kierrätyslaitokseen esimerkiksi Keski-Eurooppaan.

Haaste: Kriittisten raaka-aineiden kierrättäminen on sitä kannattavampaa, mitä kalliimpia louhitut raaka-aineet ovat. Viime vuosina kriittisten raaka-aineiden hintakehitys on ollut hyvin vaihtelevaa.^{5,6}

➡ **Ratkaisu:** Kierrättämisen kannattavuutta voisi parantaa osakkuusmalli, jossa jätteen tuottajat omistavat yhdessä kierrätysyhtiön. Tämä kannustaisi jätettä tuottavia yrityksiä ohjaamaan esimerkiksi sähkö- ja elektroniikkaromun tai kaivosten sivuvirrat kierrätykseen, koska yritykset hyötyisivät siitä taloudellisesti.

Haaste: Suomalaisten kaivosten kaivosjättekasoissa raaka-aineita on sen verran pieninä pitoisuuksina, että yksittäisen alkuaineen erottelu niistä on harvoin taloudellisesti kannattavaa.

➡ **Ratkaisu:** Kannattavuutta voisi parantaa esimerkiksi se, jos kaivosjätteestä voitaisiin samalla kertaa tuottaa muita mineraalituotteita esimerkiksi rakennusalan tarpeisiin.

Haaste: Tuotteiden sisältämien raaka-aineiden kriittisyyden arviointi edellyttäisi tuotantoketjujen läpinäkyvyyden lisäämistä.^{7,8} Yritysten keskinäinen kilpailu ja liikesalaisuudet kuitenkin estävät avoimen tiedonjaon.

➡ **Ratkaisu:** Ongelman voisi ratkaista standardeilla, joiden mukaan tuotteet pitäisi suunnitella kierrätettäviksi ja uudelleenkäytettäviksi. Standardien tulee olla riittävän teknologianeutraaleja, jottei niillä hidasteta kehitystä. Esimerkiksi yhteen akkukemiaan lukittuminen estäisi uuden korvaavan teknologian käyttöönoton.

Haaste: Suunnittelulähtöisessä kiertotaloudessa tulisi yhdistää useiden mineraaleja hyödyntävien alojen liiketoimintamalleja kiertotalousekosysteemiksi. Kaivosyritykset kuitenkin usein erikoistuvat tiettyjen metallien etsintään ja tuottamiseen. Kaivos- ja metallialan sijoittajat ja muut teollisuudenalat eivät ole tottuneet toimimaan yhdessä.

➡ **Ratkaisu:** Suunnitelmat eri raaka-aineiden hyödyntämisestä tulisi tehdä jo investointivaiheessa. Tällöin kaivos voidaan suunnitella siten, että prosessissa erotellaan kaikki kaivoksesta louhimalla saatavat raaka-aineet yksi kerrallaan. Tämä on taloudellisesti kannattavampaa kuin raaka-aineiden erottelu jälkikäteen kaivosjätteestä.

43 IEA (2023)

44 IEA (2024)

45 Ku ym. (2024)

46 Baldassarre (2025)

Haaste: Monet kierrätykseen sopivat materiaalit luokitellaan jätteeksi. Tästä syystä kierrättäminen vaatii käytännössä jätteenkäsittelylaitoksen luvat, joille on tiukat kriteerit. Jättestatus myös vaikeuttaa materiaalien kuljettamista maiden välillä.



Ratkaisu: Toiminta helpottuisi, jos kriittisiä raaka-aineita sisältävät materiaalit voitaisiin luokitella jätteen sijaan sivuvirroiksi tai sekundäärisiksi raaka-aineiksi.

Haaste: Elektroniikkatuotteita koskeva sääntely akkuasetusta lukuun ottamatta ei aseta vahvoja velvoitteita kriittisten raaka-aineiden talteenotolle.^{9,10} Erilaiset laitteet jääkaapeista älypuhelimiin menevät samaan jätevirtaan ja nykyinen sähkö- ja elektroniikkaromua koskeva EU-direktiivi asettaa kierrätystavoitteet painoperustaisesti. Nykyiset kierrätystavoitteet täyttyvätkin sillä, että kerätään talteen painavat teräs-, kupari- ja alumiiniosat.



Ratkaisu: EU:n sähkö- ja elektroniikkalaiteromua koskevan direktiivin vaatimuksia tulisi muuttaa siten, että kriittiset raaka-aineet tulevat paremmin huomioiduksi.

Haaste: Akkuasetuksen laadinnan aikana akkuteknologia on kehittynyt.



Ratkaisu: Akkuasetuksen käyttöosuusvelvoitteiden ajantasaisuus pitäisi tarkistaa.

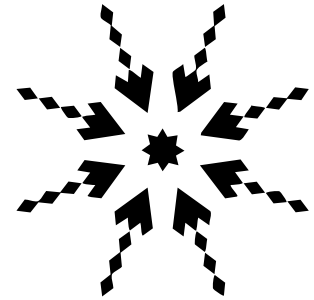
Haaste: Kriittisten raaka-aineiden säädöksessä on asetettu kovia tavoitteita, mutta keinoja tavoitteiden saavuttamiseksi on vähän.



Ratkaisu: Tarvittaisiin konkreettisia vaatimuksia koskien kriittisten raaka-aineiden kierrätystä ja kiertotaloutta.

⁴⁷ Turunen & Suikkanen (2024)
⁴⁸ Penttilä (2020)

RATKAISUJEN AVAIMIA



MIHIN PÄÄTTÄJIEN TULISI KIINNITTÄÄ HUOMIOTA?

1 Romunkerääjät, kierrätyslaitokset ja metallinjalostajat tarvitsevat kannustimen tehdä **kiertotaloudellista yhteistyötä**. Kaikkien osapuolten tulisi hyötyä toiminnasta. Romu voidaan kierrättää sellaisenaan tai siitä voidaan ottaa talteen arvokkaat osat, jotka jalostetaan uudelleen uusien tuotteiden materiaaliksi tai raaka-aineeksi.

2 Kaivoksista louhittavista aineista maksettavaa **kaivosveroa voitaisiin keventää sellaisten raaka-aineiden osalta, jotka otetaan talteen sivutuotteina kiertotalouden nimissä**. Pääasiallisen raaka-aineen kaivosverotus pidettäisiin ennallaan. Näin kannustettaisiin kaivossyhtiöitä hyödyntämään useampia kaivoksesta löytyviä raaka-aineita.

3 Kiertotalousratkaisujen **pilottihankkeisiin pitäisi ohjata rahoitusta**, sillä ilman pilotointoja ja testiympäristöjä kiertotalousratkaisut eivät skaalaudu kaupalliselle tasolle. Kriittisiä raaka-aineita sisältäviä tuotteita kierrättäville **pilottilaitoksille ja testausympäristöille pitäisi saada nopeutettu lupakäsittely**.

4 Suomen tulisi keskittyä nostamaan **raaka-aineiden jalostusastetta mahdollisimman korkeaksi**, sillä pidemmälle jalostetut raaka-aineet ovat arvokkaampia. Jalostus on tärkeää myös huoltovarmuuden näkökulmasta, sillä jonkin kansainvälisiä toimitusketjuja häiritsevän kriisitilanteen iskiessä tarvitaan teollisuudelle käyttövalmista materiaalia.

5 Kriittisten raaka-aineiden asetuksen **kiertotalousvaatimukset ovat riittämättömiä**. Muussakaan lainsäädännössä toimijoita ei velvoiteta kierrättämään kriittisiä raaka-aineita, akkuja lukuun ottamatta. Tilanteen korjaamiseksi tarvittaisiin konkreettisia vaatimuksia koskien kriittisten raaka-aineiden kierrätystä ja kiertotaloutta.

6 Kiertotalouslainsäädäntö tulisi **irrottaa jätelainsäädännöstä** omaksi kokonaisuudekseen. Sen tulisi palkita tuotteiden pitkäikäisyydestä ja materiaalien tehokkaasta kierrosta.

7 Suomen tulisi ajaa **kriittisten raaka-aineiden sisällyttämistä** mahdollisimman vahvasti **ekosuunnitteluasetukseen** sekä **sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätystä koskevan direktiivin** uudistukseen.

8 Kiertotalousratkaisujen **kestävyys pitää varmistaa** jo tutkimus- ja suunnitteluvaiheessa. Tätä varten tarvitaan **uusia arviointimenetelmiä**, jotka huomioivat ratkaisujen tekniset, taloudelliset, ympäristölliset ja sosiaaliset vaikutukset. Kaivannaisteollisuuden ja tuulivoiman tarpeita arvioitaessa tulee huomioida myös **eettiset kysymykset koskien alkuperäiskansojen** suhdetta maahan ja oikeuksia maankäyttöön.

LÄHTEET

- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Design through the 12 principles of green engineering. *Environmental science and technology*, 95(A).
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- Baldassarre, B. (2025). Circular economy for resource security in the European Union (EU): Case study, research framework, and future directions. *Ecological Economics*, 227, 108345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108345>
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., & Pontikes, Y. (2015). Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 99, 17-38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.089>
- EU. (2024). EU's Digital Product Passport: Advancing transparency and sustainability. <https://data.europa.eu/en/news-events/news/eus-digital-product-passport-advancing-transparency-and-sustainability>.
- Euroopan komissio. (2020). Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf
- Euroopan komissio. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>
- Geologian tutkimuskeskus (2022). Vanhat kaivannaisjätealueet ovat pitkäaikainen uhka ympäristölleen. Miten kunnostamista ja riskinarviointia parannetaan tutkimuksella? <https://www.gtk.fi/ajankohtaista/vanhat-kaivannaisjätealueet-ovat-pitkäaikainen-uhka-ympäristölleen-miten-kunnostamista-ja-riskinarviointia-parannetaan-tutkimuksella/>
- Geologian tutkimuskeskus. (2023). Miksi iso osa kaivannaissektorin sivuvirroista jää hyödyntämättä ja miten voimme hyödyntää mineraaliset raaka-aineet paremmin? <https://www.gtk.fi/ajankohtaista/miksi-iso-osa-kaivannaissektorin-sivuvirroista-jaa-hyodyntamatta-ja-miten-voimme-hyodyntaa-mineraaliset-raaka-aineet-paremmiin/>
- IEA. (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, Licence: CC BY 4.0
- IEA. (2023). Critical Minerals Market Review 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>, Licence: CC BY 4.0
- IEA. (2024). Global Critical Minerals Outlook 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>, Licence: CC BY 4.0
- Institute for European Environmental Policy. (2023). Circularity gaps of the European Critical Raw Materials Act. <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/10/Circularity-and-the-European-Critical-Raw-Materials-Act-IEEP-2023-1.pdf>
- Institute for European Environmental Policy. (2023). Circularity and the European Critical Raw Materials Act. <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/10/Circularity-and-the-European-Critical-Raw-Materials-Act-IEEP-2023-1.pdf>
- Jyväskylän yliopisto. (2023). Uusi hanke laittaa sähköpotkulaudat ja -pyörät kiertoon - varmistaa arvometallien riittävyyden <https://www.jyu.fi/fi/uutinen/uusi-hanke-laittaa-sahkopotkulaudat-ja-pyorat-kiertoon-varmistaa-arvometallien-riittavyyden>
- Karali, N., & Shah, N. (2022). Bolstering supplies of critical raw materials for low-carbon technologies through circular economy strategies. *Energy Research & Social Science*, 88, 102534. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102534>
- Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P., & Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>
- Kivikytö-Reponen, P., Orko, I., Muukkonen, R., Valtanen, K., Horn, S., Mölsä, K., Kauppi, T., Lavikko, S., Iivesniemi, H., Pesonen, L., & Winqvist, E. (2022). Data-Driven Circular Design – A Guide Book. https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2022/Data-driven_circular_design.pdf.
- Kivikytö-Reponen, P., Karhu, M., Hanski, J., Deubzer, O., Barros Garcia, R., & Martel Martin, S. (2023). Interconnection of critical raw materials and circular economy - myths or reality (SCRREEN2 D7.10).
- Koskinen, J., Frimodig, J., Samulin, M., Tiisonen, A., Siljanto, J., Haukka, M., & Väisänen, A. (2024). Optimization of selective hydro-metallurgical tantalum recovery from e-waste using zeolites. *ACS Omega*, 9, 14947-14954. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08907>
- Ku, A. Y., Alonso, E., Eggert, R., Graedel, T., Habib, K., Hool, A., Muta, T., Schrijvers, D., Tercero, L., Vakhitova, T., & Veeh, C. (2024). Grand challenges in anticipating and responding to critical materials supply risks. *Joule*, 1208-1223. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.03.001>
- Lahtinen, E., Hänninen, M. M., Kinnunen, K., Tuononen, H. M., Väisänen, A., Rissanen, K., & Haukka, M. (2018). Porous 3D printed scavenger filters for selective recovery of precious metals from electronic waste. *Advanced Sustainable Systems*, 2(10), 1-5, 1800048. <https://doi.org/10.1002/adsu.201800048>
- Laki saamelaiskäräjistä (1995/974 § 9)
- Lee, D., & Bony, L. (2007). Cradle-to-Cradle design at Herman Miller: Moving toward environmental sustainability. Harvard Business Publishing.
- Michaux, S. (2024). Estimation of the quantity of metals to phase out fossil fuels in a full system replacement, compared to mineral resources. *Geological Survey of Finland, Bulletin - Special Issue*, 416. <https://doi.org/10.30440/bt416>
- Nijnsen, J., Behrens, P., Kraan, O., Sprecher, B., & Kleijn, R. (2023). Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system. *Joule*, 7(11), 2408-2413. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.10.005>
- Niskanen, J., Lahtinen, M., & Perämäki, S. (2022). Acetic acid leaching of neodymium magnets and iron separation by simple oxidative precipitation. *Cleaner Engineering and Technology*, 10, Article 100544 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100544>
- Penttilä, M. (2020). EU Legislation on WEEE Recycling and its Failure to Close The Loop of Critical Raw Materials. Master's thesis. University of Helsinki, Helsinki. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/07e732ef-d0e2-49af-a802-ca3dbe798588/content>
- Perämäki, S., Tiisonen, A., Rajahalme, J., Larsson, S., Lahtinen, E., Niskanen, J., Budhathoki, R., & Väisänen, A. (2022). Dry chlorination of spent nickel metal hydride battery waste for water leaching of battery metals and rare earth elements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108200. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108200>
- Perez, J. P. H., Folens, K., Leus, K., Vanhaeck, F., Van Der Voort, P., & Du Laing, G. (2019). Progress in hydrometallurgical technologies to recover critical raw materials and precious metals from low-concentrated streams. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
- Porvali, A., Shukla, S., & Lundström, M. (2020). Low-acid leaching of lithium-ion battery active materials in Fe-catalyzed Cu-H2SO4 system. *Hydrometallurgy*, 195, 105408. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105408>
- Rajahalme, J., Perämäki, S., & Väisänen, A. (2022). Separation of palladium and silver from e-waste leachate: Effect of nitric acid concentration on adsorption to thiol scavenger. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100280>
- S&P Global. (2023). New lithium mining, refining projects set to strengthen Europe's battery supply chains. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/pt/market-insights/latest-news/metals/121123-new-lithium-mining-refining-projects-set-to-strengthen-europes-battery-supply-chains>
- Terveiden ja hyvinvoinnin laitos (2024). Kaivokset vesistöjen kuormittajana <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/vesi/kaivokset-vesistojen-kuormittajana>
- Tura, N., Hanski, J., Ahola, T., Stähle, M., Piiparinen, S., & Valkokari, P. (2019). Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 212, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.202>
- Turunen, T., & Suikkanen, J. (2024). EU and recycling of critical raw materials: Stuck in legal limbo? *European Energy and Environmental Law Review*, 33(3), 139-149. <https://kluwerlawonline.com/journalarticle/European+Energy+and+Environmental+Law+Review/33.3/EELR2024009>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2024a). Kaivannaisteollisuuden sivukivien kierrätyksen koordinaatioryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2024:14. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-992-6>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2024b). Kansallinen mineraalistrategia. Valtioneuvoston julkaisuja 2024:65 <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-746-1>
- Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2024). Kaivostoiminta Suomessa <https://www.ymparisto.fi/fi/kestava-kierto-ja-biotalous/luonnonvarojen-ja-raaka-aineiden-kaytto/kaivostoiminta>



SUOMALAINEN TIEDEAKATEMIA
FINNISH ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS
ACADEMIA SCIENTIARUM FENNICA

J&AE JANE JA AATOS
ERKON SÄÄTIÖ