

TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-R-00337-26



Materiaalitarpeet Suomen puhtaan energiajärjestelmän siirtymässä

Kirjoittajat:

Anni Niemi, Kati Koponen, Vafa Järnefelt, Tiina Koljonen (VTT), Tytti Alapieti, Laura Sokka (Syke), Harri Kaikkonen, Teppo Arola, Mari Kivinen (GTK)

Luottamuksellisuus: VTT Public

Versio: 25.06.2026



Raportin nimi Materiaalitarpeet Suomen puhtaan energiajärjestelmän siirtymässä	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Euroopan Unioni, Next Generation EU	Asiakkaan viite
Projektin nimi REPower-CEST	Projektin numero/lyhytnimi GG_RRF_REP-CEST
Raportin laatijat Anni Niemi, Kati Koponen, Vafa Järnefelt, Tiina Koljonen (VTT), Tytti Alapieti, Laura Sokka (Syke), Harri Kaikkonen, Teppo Arola, Mari Kivinen (GTK)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 32/11
Avainsanat Materiaalikysyntä, kriittiset materiaalit, kiertotalous, energiasiirtymä	Raportin numero VTT-R-00337-26
Tiivistelmä Raportti arvioi puhtaan energiasiirtymän materiaalityrpeita Suomessa vuosina 2030–2040. Tarkastelu kattaa aurinkosähkön, maa- ja merituulivoiman, sähköautojen akut, lämpöpumput, elektrolyysit sekä sähkön kantaverkon ja vetyinfrastruktuurin. Materiaalityrpeet on laskettu kolmen energiaskenaarion pohjalta ja suhteutettu kaivostuotantoon Suomessa ja EU:ssa. Suurimmat materiaalityrrat syntyvät maatuulivoiman ja aurinkosähkön rakentamisesta. Absoluuttisesti merkittävimmät materiaalityrrat ovat teräs ja betoni, joiden kulutus on kymmeniä tuhansia kilotonneja. Kriittisistä materiaaleista alumiini, kupari, nikkeli, mangaani ja pii ovat kulutukseltaan suurimmat. Harvinaiset maametallit ovat massamääriltään pieniä, mutta kriittisiä toimitusketjujen näkökulmasta; niiden tuotantoa dominoi Kiina. Suomen oma kaivostuotanto kattaa laskennallisesti joidenkin materiaalityrien, kuten koboltin, kromin ja nikkelin, energiateknologioiden vuosittaisen tarpeen, mutta kilpailu samoista raaka-aineista on laajempaa, sekä eurooppalaista että globaalia. Energiasiirtymän teknologiat ovat monin osin kierrätettäviä, mutta kiertotalouden todellinen haaste on arvon ja kriittisten materiaalityrien säilyttäminen. Suuret metalli- ja mineraalityrrat, kuten teräs, alumiini, kupari, betoni ja lasi, voidaan usein palauttaa kiertoon paremmin kuin pienipitoiset kriittiset metallit, komposiitit, kalvot, elektrolyytit, magneetit ja monikerrosrakenteet. Siksi massaperusteinen kierrätys ei yksin riitä kuvaamaan kiertotalouden onnistumista. Analyysi osoittaa, että kiertotalous on välttämätön osa materiaalityrurvallisuutta, mutta se ei yksin riitä kattamaan energiasiirtymän nopeasti kasvavaa strategisten ja kriittisten materiaalityrien tarvetta. Tämän vuoksi materiaalityrpeisiin on vastattava myös materiaalityrien käytön monipuolistamisella, materiaalityrehokkuudella sekä materiaalityr-innovaatioilla, jotka mahdollistavat kriittisten ja niukkojen materiaalityrien korvaamisen siellä, missä se on teknisesti ja ympäristöllisesti perusteltua. Vahva kiertotalous edellyttää keräysjärjestelmiä, jäljitettävyyttä, kierrätykseen ja purkamiseen suunnittelua, käyttöä pidentämistä, uudelleenkäyttöä ja laadukasta materiaalityrkohtaista talteenottoa.	
Luottamuksellisuus	VTT Public
Espoo 26.6.2026 Laatija Anni Niemi, Tutkija Tarkastaja Tuula Mäkinen, Lead, Green Electrification	
VTT:n yhteystiedot Anni Niemi, anni.niemi@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) VTT:n ja REPower-CEST-hankkeen internetsivut	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

TUTKIMUSRAPORTTI VTT-R-00337-26

2 (43)

Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä:

29 June 2026

Allekirjoitus:

DocuSigned by:
Tuula Mäkinen
0F49618E9A784F6...

Nimi:

Tuula Mäkinen

Asema:

Lead, Green Electrification



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

TUTKIMUSRAPORTTI VTT-R-00337-26

3 (43)

Alkusanat

Suomen energia- ja ilmastotavoitteet edellyttävät nopeaa uusiutuvan energiantuotannon kasvua sekä sähkö- ja vetyinfrastruktuurin merkittävää laajentamista. Samalla materiaalihuollon varmuus, kriittisten raaka-aineiden saatavuus ja geopoliittiset riskit korostuvat osana puhtaan energiajärjestelmän siirtymää. Puhtaan energiasiirtymän materiaalityökalujen mittakaava raaka-aineiden tuotannon, jalostuksen, käytön ja kierrätyksen näkökulmista onkin yhä keskeisempi kysymys.

Tässä raportissa on tutkittu puhtaan energiasiirtymän materiaalityökaluja Suomessa vuosina 2030–2040. Tarkastelu kattaa aurinkosähkön, maa- ja merituulivoiman, sähköautojen akut, lämpöpumput, elektrolyysit sekä sähkön kantaverkon ja vetyinfrastruktuurin. Materiaalityökalut on laskettu kolmen energiaskenaariot pohjalta ja suhteutettu kaivostuotantoon Suomessa ja EU:ssa. Lisäksi on tarkasteltu kriittisten materiaalien kierrätysmahdollisuuksia.

Tämä raportti on laadittu osana Euroopan Unionin rahoittamaa REPower-CEST-hanketta.



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

Euroopan unionin rahoittama – NextGenerationEU. Esitetyt näkemykset ja mielipiteet ovat ainoastaan tämän tekstin laatijoiden näkemyksiä eivätkä välttämättä vastaa Euroopan unionin tai komission kantaa. Euroopan unioni ja komissio eivät ole vastuussa niistä.

Espoossa 25.6.2026

Tekijät

Kansikuva: Adobe Stock



Sisällysluettelo

Alkusanat	3
1. Johdanto	5
2. Metodi	6
2.1 Materiaali-intensiteetit	6
2.2 Skenaariot	7
3. Tulokset	10
3.1 Perinteiset rakennusmateriaalit	10
3.2 Kriittiset materiaalit	12
3.3 Harvinaiset maametallit	15
3.4 Muut materiaalit	17
3.5 Sähkö- ja vetyverkot	19
3.6 Geoenergia (maalämpöpumput)	21
4. Kierrätysmahdollisuudet	22
5. Tulosten tarkastelua	24
5.1 Kriittisten ja strategisten materiaalien kulutus kasvaa - kiertotalouden ratkaisuja tarvitaan	24
5.2 Vertailu kotimaiseen ja EU:n kaivostuotantoon	24
6. Yhteenveto	28
Lähdeviitteet	30
Liite 1: Materiaali-intensiteettitaulukot	33
Liite 2: Eri teknologioiden kiertotalousmahdollisuudet	35



1. Johdanto

Suomen energia- ja ilmastotavoitteet edellyttävät nopeaa uusiutuvan energiantuotannon kasvua sekä sähkö- ja vetynfrastruktuurin merkittävää laajentamista (Koljonen ym. 2025a, 2025b). Samalla materiaalihuollon varmuus, kriittisten raaka-aineiden saatavuus ja geopolittiset riskit korostuvat osana puhtaan energiajärjestelmän siirtymää (Saarenaho ym. 2026; Soimakallio ym. 2026). Energiajärjestelmän teknologinen murros lisää monien metallien, jotka luokitellaan kriittisiksi tai strategisiksi raaka-aineiksi, ja muiden tavanomaisempien rakennusmateriaalien, kuten betonin kysyntää. Puhtaan energiasiirtymän materiaalitarpeiden mittakaava onkin yhä keskeisempi kysymys sekä raaka-aineiden tuotannon, jalostuksen että käytön näkökulmista. Uusien teknologioiden käyttöönoton lisäksi myös materiaalien kierrätys ja kriittisten materiaalien korvaaminen uusilla teknologioilla korostuvat.

Kriittisten materiaalien tarve vihreässä siirtymässä muiden sektorien materiaalitarpeen ohella on tunnustettu Euroopan Unionissa (EU). EU pyrkii varmistamaan teollisuudelle kriittisten ja strategisten materiaalien turvallisen ja kestäväen saatavuuden vuonna 2024 voimaan tulleen EU:n kriittisten raaka-aineiden asetuksen (Euroopan Komissio 2024a) avulla. Asetuksessa on listattu strategiset ja kriittiset raaka-aineet, joilla on suuri taloudellinen merkitys Euroopalle ja joiden toimitushäiriöiden riski on suuri. Asetuksessa kriittisiä raaka-aineita on nimetty yhteensä 34, joista 17 on lisäksi strategisia. Asetus määrittää vuodelle 2030 vertailuarvot strategisille raaka-aineille: vähintään 10 % EU:n vuosikulutuksesta on louhittava, 40 % jalostettava ja 15 % kierrätettävä EU:ssa. Lisäksi asetus rajoittaa riippuvuuden enintään 65 prosenttiin yksittäisestä EU:n ulkopuolisesta maasta kunkin raaka-aineen osalta.

Tässä raportissa kootaan Puhtaan energiajärjestelmän siirtymä (REPower-CEST) -projektissa laadittuja arvioita ilmastomuutoksen hillintäskenaarioihin liittyvistä resurssitarpeista Suomessa. Raportti kokoa aurinko-, maa- ja merituulivoiman, geoenergian (maalämpöpumput), sähköautojen akkujen, sekä elektrolyysereiden materiaalitarpeita vuosina 2030–2040. Arviot perustuvat eri energiaskenaariotarkasteluissa laadittuihin arvioihin energiajärjestelmien ja investointitarpeiden kehityksistä. Teknologioiden kapasiteettikehitysarvioiden taustalla käytettiin 1) kansallisen energia- ja ilmastostrategian taustalle laaditun KEITO-hankkeen lisätoimiskenaariota (WAM, With Additional Measures), 2) KEITO-hankkeen pitkän aikavälin ilmastoskenaariotyön Markkinat edellä -skenaariota (BIZ) (Koljonen ym. 2025a, Koljonen ym. 2025b) sekä 3) aurinko-, maa- ja merituulivoiman ja elektrolyysereiden osalta myös ENTSO-E:n TYNDP (Ten-Year Network Development Plan) National Finland-skenaariossa (ENTSO-E, 2025) laskettuja teknologioiden kapasiteettikehityksiä. Lisäksi tarkasteluun sisältyvät arviot sähkön kantaverkon vahvistamistarpeista sekä vetynverkon rakentamiseen liittyvistä materiaalitarpeista.

Raportissa käsitellään sekä kriittisten ja strategisten raaka-aineiden että perinteisten rakennusmateriaalien, kuten teräksen ja betonin, roolia siirtymisessä vähähiiliseen energiajärjestelmään. Kriittisiin materiaaleihin kuuluvat myös harvinaiset maametallit (REE, rare earth elements), jotka ovat 17 erikoismetallin ryhmä, jota käytetään monissa korkean teknologian sovelluksissa, kuten älypuhelimissa, tuuliturbiineissa ja sähkömoottoreissa. EU ei itse tuota lainkaan harvinaisia maa-metalleja. (Euroopan Komissio 2024b) Raportin tarkasteluissa yhteenlaskettuja materiaalitarpeita suhteutetaan raaka-aineiden kaivostuotantoon Suomessa ja EU:ssa. Tarkastelu tuo esiin, millaisia haasteita raaka-ainetarpeiden mittakaava ja rakenne voivat aiheuttaa energiateknologioiden käyttöönottoon ja järjestelmän laajentumiseen. Lisäksi arvioidaan, missä määrin kiertotalouden ratkaisut, kuten materiaalien talteenotto, uudelleenkäyttö ja elinkaaren pidentäminen, voivat lieventää materiaalipaineita ja vähentää riippuvuuksia primääriraaka-aineista.



Raportin tavoitteena on muodostaa selkeä kokonaiskuva puhtaan energiajärjestelmän materiaali-tarpeista Suomessa, tunnistaa kriittiset pisteet sekä osoittaa alueita, joilla tarvitaan lisätutkimusta, tarkempaa dataa tai jatkokehitystä materiaalivirtojen ja -intensiteettien arvioinnissa.

2. Metodi

2.1 Materiaali-intensiteetit

Teknologioiden materiaalit tarpeet arvioitiin julkisiin kirjallisuuslähteisiin perustuvien materiaali-intensiteettien avulla. Tällä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon tiettyä materiaalia tarvitaan eri energiateknologioiden valmistukseen tiettyä tuotantokapasiteettia kohden (kg/MW). Tarkastelu rajautuu suoran valmistuksen materiaalit tarpeisiin; luvut eivät siis kata koko elinkaaren (LCA) aikaisia materiaalivirtatarpeita, kuten raaka-aineiden louhintaa tai käytöstä poiston materiaalivirtoja. Tarkastelussa esiintyvät materiaalit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Aurinko-, maa- ja merituulivoimaan, elektrolyysereihin sekä sähköauton akkuihin tarvittavat materiaalit. EU:n kriittisiksi tai strategisiksi määrittelemät materiaalit on merkitty punaisella. Kupari ja nikkeli ovat strategisiksi määriteltynä, muut kriittisiksi. (Euroopan Komissio, 2023)

Ag	Dy	Mo	Si	Betoni
Al	Fe	Nd	Tb	Lasi
B	In	Ni	Ti	Polymeerit ja muovi
C	Ir	P	Y	Teräs
Co	La	Pr	Zn	
Cr	Li	Pt	Zr	
Cu	Mn	Sc		

Tuuli- ja aurinkovoiman sekä sähkönsiirtoverkkojen materiaali-intensiteettien päälähteinä käytettiin Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen Joint Research Centren (JRC) julkaisuja, erityisesti tuuli- ja aurinkosähköä koskevia *Deep Dive on Critical Raw Materials* -raportteja (Carrara ym. 2025; Taylor ym. 2025) sekä sähkönsiirtoverkkojen materiaalit tarpeita käsittelevää analyysiä (Nohl ym. 2025). Näitä julkaisuja hyödynnetään laajasti EU:n energia- ja raaka-ainepolitiikan taustaineistona, ja ne tarjoavat läpinäkyvät ja vertailukelpoiset arviot teknologioiden materiaalisällöistä. Elektrolyysereiden osalta materiaali-intensiteetit perustuivat vertaisarvioituun kirjallisuuskatsaukseen (Eikeng ym. 2024), joka kokoaa yhteen useita kirjallisuuslähteitä ja teknologioita. Kyseistä katsausta on hyödynnetty myös kansainvälisissä energiajärjestelmäanalyyseissä, kuten International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook -raporteissa, mikä tukee sen soveltuvuutta strategiseen tarkasteluun. Materiaali-intensiteetit löytyvät Liitteestä 1.

Koska teknologioiden materiaalisällöt vaihtelevat merkittävästi alateknologioiden, kuten erilaisten tuulivoimalatyypin välillä, laskennassa huomioitiin teknologiakohtaiset osuudet kirjallisuuteen perustuvien arvioiden mukaisesti (Carrara ym. 2025; Taylor ym. 2025; Eikeng ym. 2024). Aurinko-sähkön osalta tarkasteltiin eri kennoteknologioita, erityisesti piipohjaisia kennoja ja niiden materiaalikostumusta. Tuulivoimassa eroteltiin eri turbiinityypit, mukaan lukien kestonagneetteja (Permanent Magnets, PM) hyödyntävät ratkaisut, joilla on vaikutusta harvinaisten maametallien tarpeeseen. Elektrolyysereiden osalta tarkasteluissa huomioitiin keskeiset teknologiat: alkalinen elektrolyysi, protoninvaihtokalvoelektrolyysi (PEM) sekä kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC).



Tarkastelu koskee suoraan materiaalikäyttöä infrastruktuuriin ja laitteiden rakentamisessa. Materiaalien tuotantoketjujen päästöjä, energiankulutusta tai epäsuoria vaikutuksia ei sisällytetty laskentaan. Tuulivoiman osalta tarkastelussa on huomioitu keskeiset turbiinikomponentit, mukaan lukien laakerit, lavat, vaihteisto, generaattorikotelointi, kestopagneetit, akselit sekä tornirakenteet (teräs ja betoni). Tarkastelun ulkopuolelle on rajattu osa apukomponenteista ja infrastruktuurista, kuten kaapeloinnit, merituulivoiman monopaalit sekä voimalaitos- ja turbiinikohtaiset muuntajat. Aurinkosähkön osalta tarkastelu kattaa täysimittaiset PV-järjestelmät, mukaan lukien moduulit, invertterit, asennusrakenteet ja kaapeloinnin.

Yllä kuvattuun materiaalitarkasteluun yhdistettiin Sykessä tehty tarkastelu sähköautojen akkujen materiaalitarpeista. Sähköautojen akkujen materiaalitarkastuksessa metodina oli elinkaariarviointi (LCA), joka tehtiin SimaPro 9.6.0.1-elinkaariarviointiohjelmistolla, ja käytetyt tiedot perustuivat tieteelliseen kirjallisuuteen sekä Ecoinvent 3.10 -tietokantaan (SimaPro 2025). Elinkaariarviointi tehtiin ISO-standardien 14040 ja 14044 mukaan (ISO 14044:2006 & ISO 14040:2006). Akkujen materiaali-koostumus perustui julkaisuun *Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry Addition for Lithium-Ion Batteries in GREET 2020*, jonka ovat laatineet Winjobi, Dai ja Kelly (2020), sekä Ecoinvent 3.10 -tietokantaan (Ecoinvent 2025).

LCA-laskennassa arvioitiin akkumateriaaleihin ja tuotantoprosesseihin liittyvää mineraalikulutusta ja ympäristövaikutuksia. Toimintayksikkönä oli 1 kWh akun energiavarastointikapasiteettia ja tarkastelu rajattiin mineraalituotannosta akun valmistukseen. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin käyttövaihe, kierrätys sekä loppuvaiheen käytöstä poiston prosessit, sillä tarvittavaa dataa ei ollut saatavilla. (Alapieti 2026) Tässä tutkimuksessa käytetty akun kokonaisenergiakapasiteetti oli 70 kWh, mikä vastaa Kansainvälisen energijärjestön (IEA) raportoimaa sähköautojen keskimääräistä akkukapasiteettia EU:ssa vuonna 2024 (IEA 2025).

Tällä hetkellä yleisimmin käytetyt ladattavat litiumioniakkukemiat sähköajoneuvoissa ovat nikkeli-mangaani-koboltti- (NMC) tai litium-rauta-fosfaatti (LFP) -katodi yhdistettynä grafiittianodiin. Tarkasteluun valittiin LFP-akku luonnon grafiittianodilla ja NMC811-akku synteettisellä grafiittianodilla. NMC811-akussa on nikkeliä, mangaania ja kobolttia suhteessa 8:1:1. Tämä korkea nikkeli-pitoisuuteen perustuva NMC-akkukemia edusti 77 % EU:n sähköajoneuvojen myynnistä vuonna 2024 (IEA 2025). Täyssähköautojen akkujen resurssikulutuksen laskennassa on arvioitu, että 85 prosenttia Suomen sähköautojen akuista olisi NMC-akkuja ja 15 prosenttia LFP-akkuja vuonna 2030. Vuoteen 2040 tultaessa, LFP-akkujen osuus nousisi 25 prosenttiin ja NMC-akkujen osuus olisi 75 prosenttia.

Lisäksi GTK arvioi erillisessä tarkastelussa kirjallisuuslähteisiin ja markkinatietoihin perustuen maalämpöpumppujen materiaalitarpeita, jotka on raportoitu osana tätä raporttia luvussa 3.6.

2.2 Skenaariot

Tässä raportissa tarkastelu perustuu kahteen KEITO-hankkeen skenaarioon: lisätoimiskenaarioon (WAM, *With Additional Measures*) sekä Markkinat edellä -skenaarioon (BIZ). KEITO-skenaarioiden lähtökohdat, oletukset sekä tulokset on esitetty julkaisuissa Koljonen ym. 2025a ja Koljonen ym. 2025b. Lisäksi aurinko-, maa- ja merituulivoiman ja elektrolyysereiden osalta on laskettu materiaali-tarpeet myös ENTSO-E:n TYNDP (*Ten-Year Network Development Plan*) National Finland-skenaariossa (ENTSO-E, 2025).

KEITO WAM-skenaario on kansallisen energia- ja ilmastostrategian sekä keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnittelun (KAISU) taustalle laadittu skenaario ja kuvaa kehitystä, jossa nykyisten politiikkatoimien lisäksi toteutetaan joukko uusia, PMI Orpon hallituksen aikana tunnistettuja mahdollisia lisätoimia. Teknologioiden käyttöönotto kasvaa siinä nykytilanteeseen verrattuna, mutta investointitaso pysyy maltillisena ja kehitys tapahtuu pääosin markkinaehtoisesti. WAM-skenaario



edustaa tavoitteellisempaa kehityspolkua kuin nykytoimien skenaario (WEM), mutta KEITO-hankkeen omien johtopäätösten mukaan edes WAM-skenaariossa ilmastolain mukaisia päästö- vähennystavoitteita vuosille 2030, 2040 ja 2050 ei saavuteta nykytoimin; lisätoimilla ne olisivat saavutettavissa, mikäli investoinnit puhtaaseen siirtymään toteutuvat riittävän nopeasti. Erityisesti vuosien 2040 ja 2050 tavoitteiden saavuttaminen edellyttää merkittäviä investointeja teknisiin hiilinieluihin. WAM-skenaariota ei siis tule pitää takeena tavoitteiden toteutumisesta. (Koljonen ym., 2025a)

BIZ-skenaario puolestaan on osa pitkän aikavälin ilmastoskenaariotarkastelua (LTS), jossa laadittiin neljä vaihtoehtoista kehityskulkua. Tähän työhön valitussa "Markkinat edellä" BIZ-skenaariossa lähtökohtana oli, että puhtaiden teknologioiden kehitys ja kysynyt kehittyvät nopeasti ja investoinnit toteutuvat markkinaehtoisesti. Energialjärjestelmän murrosta ohjaavat ennen kaikkea teknologinen kehitys kaikilla energiasektoreilla ml. sähköistyminen ja digitalisaatio. Yritysten markkinaehtoisia investointeja vauhdittavat erityisesti oletetut korkeat päästöoikeuksien hinnat, jotka vastaavat komission hinta-arvioita nettonollapäästökehityksestä kaikissa EU:n jäsenmaissa. Sähkön loppukulutus yli kaksinkertaistuu vuoteen 2050 mennessä, kun sähköistyminen etenee nopeasti ja mittavat investoinnit muun muassa datakeskuksiin lisäävät sähkön kysyntää. BIZ-skenaariossa uusiutuvan energian tuotantokapasiteetti kasvaa siten voimakkaasti. BIZ-skenaariolle on ominaista myös uusien teknologioiden laaja käyttöönotto: teknologisten hiilinielujen (kuten BECCS ja DACCS) rooli kasvaa merkittävästi, merituulivoima ja aurinkovoima laajenevat teollisessa mittakaavassa, ja pienydinvoiman (SMR) käyttöönotto monipuolistaa energian tuotantorakennetta. Datakeskusten voimakkaan kasvun lisäksi sähkönkulutusta kasvattaa liikenteen nopea sähköistyminen, verrattain korkeat energiantensiivisen teollisuuden tuotantomäärät sekä jopa solumaatalouden tuotannon kasvu. (Koljonen ym., 2025b)

Skenaariot eroavat toisistaan ennen kaikkea muutoksen ajureiden ja mittakaavan osalta: WAM perustuu verrattain maltillisten politiikkatoimien asteittaiseen vaikutukseen, kun taas BIZ kuvaa nopeaa, markkinaehtoista murrosta, jossa investoinnit ja teknologinen kehitys kiihdyttävät muutosta. Tämän seurauksena BIZ johtaa selvästi suurempiin energiantuotannon kapasiteetteihin ja vastaaviin materiaalitarpeisiin.

WAM ja BIZ on valittu tarkasteluun, koska ne yhdessä rajaavat teknologioiden kapasiteettien kehityksen riittävän suuren vaihteluvälin: WAM edustaa nykykehitykseen pohjautuvaa keskipitkän aikavälin kehitystä nykyisen politiikkakehityksen puitteissa (kansallinen, EU), kun taas BIZ kuvaa tilannetta, jossa puhtaat energiainnovaatiot ja -ratkaisut kaupallistuvat nopeasti ja investoinnit myös toteutuvat nopeasti markkinaehtoisesti. ENTSO-E:n Suomen skenaariot on otettu lisäksi mukaan, sillä niissä etenkin maatuulivoiman ja elektrolyysereiden määrä on merkittävästi suurempi kuin KEITO-skenaarioissa. ENTISOE-skenaarioita on myös käytetty REPower-hankkeen työpaketin 1 skenaarioanalyysien lähtökohtana (esim. Hiltunen ym. 2026, Kirppu ym. 2026).



Taulukko 2. KEITO-hankkeen WAM- ja BIZ-skenaarioiden kapasiteetit (MW) eri teknologioille Suomessa vuosina 2030 ja 2040.

Skenaario	Teknologia	2030 (MW)	2040 (MW)
BIZ	Maatuulivoima	15 950	17 792
BIZ	Merituulivoima	261	9 100
BIZ	Aurinkovoima	14 445	37 324
BIZ	Elektrolyyserit	452	1 909
BIZ	Täyssähköautojen akut	8 910	45 686
WAM	Maatuulivoima	12 291	16 622
WAM	Merituulivoima	260	361
WAM	Aurinkovoima	6 010	8 090
WAM	Elektrolyyserit	697	1 141
WAM	Täyssähköautojen akut	9 054	46 234
ENTSO-E	Maatuulivoima	25 992	54 790
ENTSO-E	Merituulivoima	1 000	4 900
ENTSO-E	Aurinkovoima	10 695	21 390
ENTSO-E	Elektrolyyserit	8 727	29 500

Teknologiakohtaiset materiaalmäärät (kg) laskettiin kertomalla skenaarioiden mukaiset kapasiteetit kirjallisuudesta kootuilla materiaali-intensiteeteillä (liite 1). Sähköautojen kohdalla akkujen materiaalmäärät perustuvat skenaarioiden mukaisiin sähköautojen lukumääriin ja elinkaari-inventaarioon. Tulokset koottiin vuosille 2030 ja 2040 erikseen.

WAM- ja BIZ-skenaarioissa on esitetty liikenteessä olevien sähköautojen lukumäärä. WAM-skenaariossa täyssähköhenkilöautoja arvioidaan olevan 637 000 ja vuonna 2040 Suomen noin kolmesta miljoonasta henkilöautosta kaksi miljoonaa olisi täyssähköautoja. Sähköauton akku pitää uusia, kun sen kapasiteetista on jäljellä noin 80 %. Akun käyttöikä on noin 8–15 vuotta, ja tässä laskennassa on käytetty oletuksena kymmentä vuotta, jonka jälkeen akku täytyy uusia. Näin ollen tarvittavien akkujen lukumäärä on suurempi kuin täyssähköautojen lukumäärä. Lisäksi taulukossa 2 on oletettu akun keskimääräiseksi energiakapasiteetiksi 70 kWh ja ajonaikaiseksi keskimääräiseksi toimintamatkaksi 5 tuntia. Kannattaa myös huomata, että täyssähköautojen lisäksi sekä WAM- että BIZ-skenaarioissa on mukana hybridi-autoja, joiden akkumateriaalitarpeita ei ole huomioitu tässä laskelmassa. Toisaalta BIZ-skenaariossa uudet sähköpolttoaineet vähentävät sähköautojen ja siten akkujen tarvetta.

Lisäksi raportissa arvioitiin erikseen Suomen vetyverkon (noin 1500 km) rakentamiseen liittyvät materiaalit tarpeet sekä 400 kV kantaverkon vahvistuksiin tarvittavat materiaalmäärät. Kantaverkon materiaalit tarpeet perustuivat WAM-skenaarioiden vuoden 2040 kysyntään (130 TWh) vastaavaan Fingridin 2040-skenaarioiden arvioimaan vahvistamistarpeeseen, joka sisältää noin 4200 km 400 kV AC -ilmajohtoja. Tarkastelu kattaa ainoastaan kantaverkon; siihen ei sisälly jakeluverkkoa tai muuntajia. (Fingrid, 2025)

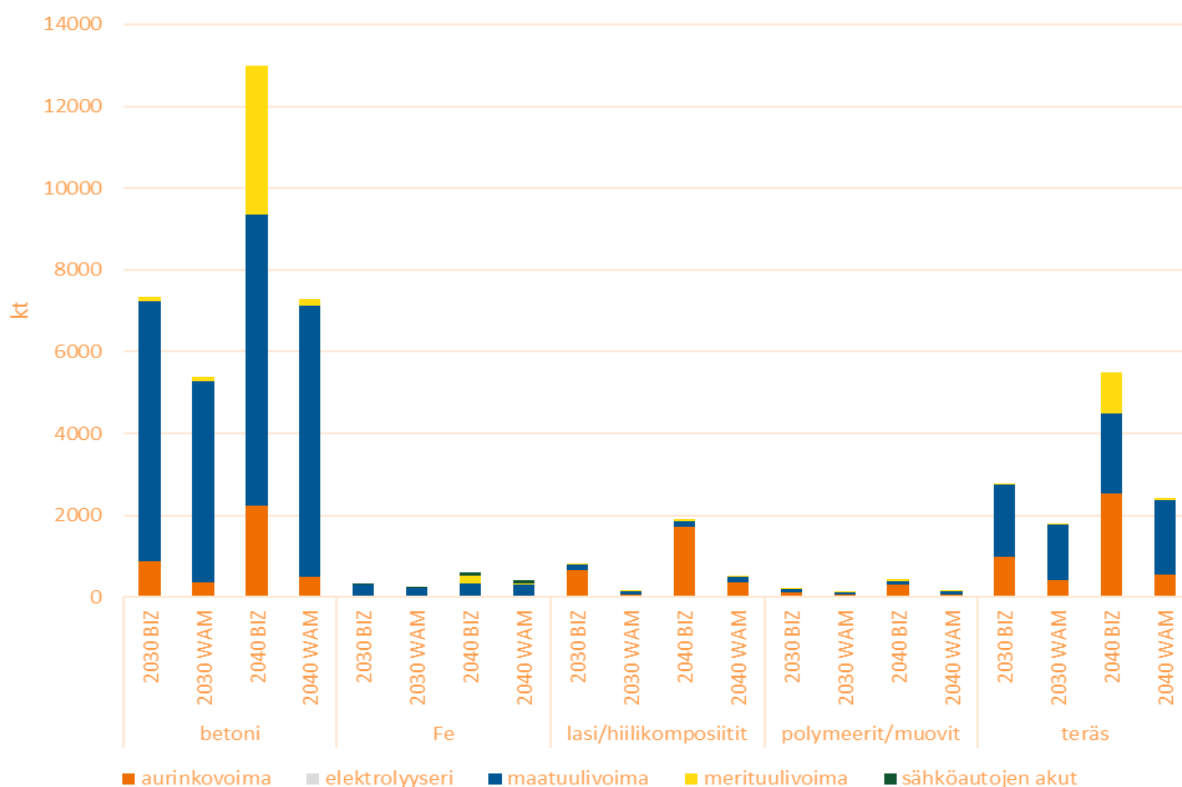


3. Tulokset

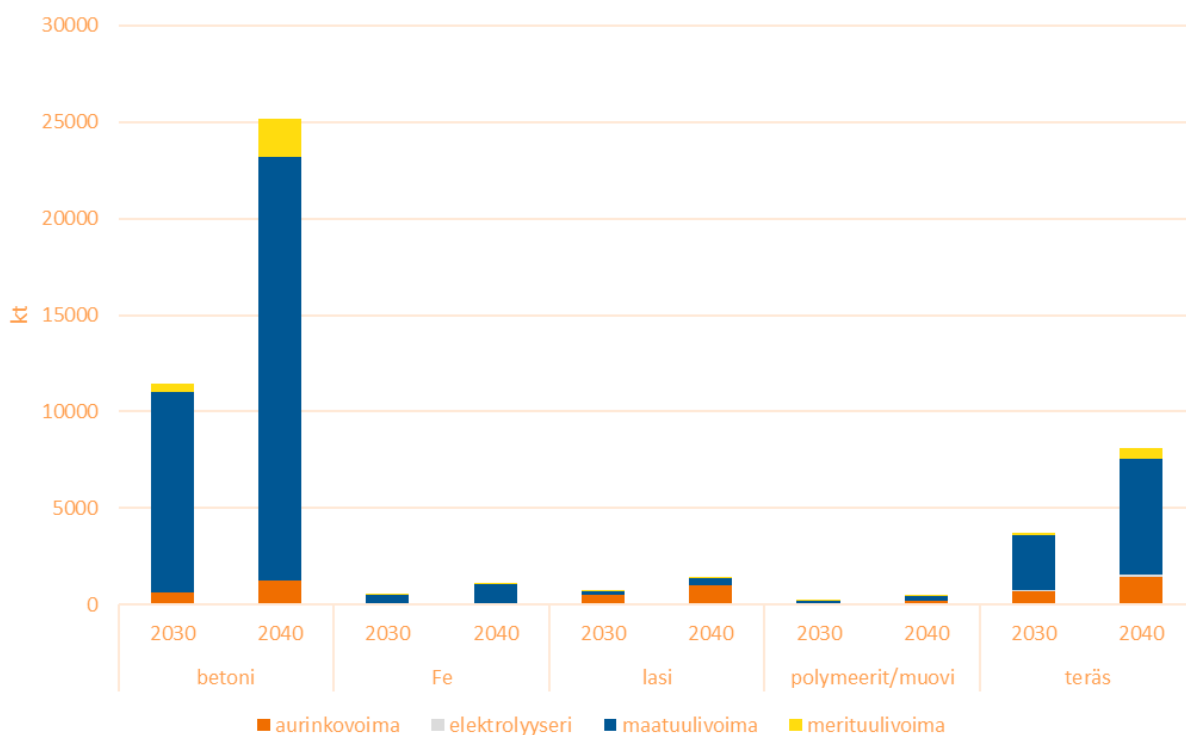
3.1 Perinteiset rakennusmateriaalit

Uusiutuvan energiantuotannon ja siihen liittyvän infrastruktuurin rakentaminen edellyttää merkittäviä määriä perinteisiä rakennusmateriaaleja, erityisesti betonia ja terästä, mutta myös lasia ja muovia. Tarkastelussa ovat mukana maa- ja merituulivoima, aurinkovoima ja elektrolyysit, mutta ei täyssähköautojen akut. Lisäksi mukana on tässä kohtaa myös rauta (Fe), jonka tarve on samaa suuruusluokkaa muiden perinteisten rakennusmateriaalien kanssa, ja merkittävästi suurempi kuin myöhemmissä luvuissa käsiteltävät materiaaluokat. Raudan määrä on laskettu myös täyssähköautojen akuille. Tarkastelussa vuosien 2030–2040 välillä suurimmat materiaalivirrat muodostuvat etenkin betonista ja teräksestä, kun materiaaltarpeet jaetaan koko tarkastelujakson pituudelle (kuvat 1a ja 1b). Betonin osalta arvioitu keskimääräinen vuotuinen tarve on noin 190 tuhatta tonnia WAM-skenaariossa ja 565 tuhatta tonnia BIZ-skenaariossa, kun tarkastellaan vuosien 2030 ja 2040 kapasiteettien välistä erotusta. Teräksen osalta vuotuiset tarpeet ovat noin 63 tuhatta tonnia WAM-skenaariossa ja 274 tuhatta tonnia BIZ-skenaariossa. Lasia ja muita hiilikomposiitteja tarvitaan merkittäviä määriä etenkin aurinkovoimaan. Rautaa tarvitaan tuulivoimaan ja täyssähköautojen LFP-akkuihin. Tulosten mittakaavaa havainnollistaa vertailu nykyiseen materiaalinkäyttöön: Suomessa käytetään tällä hetkellä noin 12 miljoonaa tonnia betonia vuodessa, jolloin uusiutuvan energiainfrastruktuurin rakentaminen vastaisi BIZ-skenaariossa noin 5 prosenttia nykyisestä betoninkulutuksesta. Lisäksi on huomioitava, etteivät nämä luvut sisällä tuulivoimaloihin tarvittavia kaapelointeja ja muuntajia. Materiaalimäärien laskemisessa ei ole huomioitu materiaalien uudelleenkäyttöä ja muita kiertotalousratkaisuja, joiden potentiaali perinteisten rakennusmateriaalien osalta on mahdollisesti merkittävä.

ENTSO-E:n skenaarioissa betonin ja teräksen määrät ovat vielä suuremmat. Sen sijaan lasin määrä on etenkin BIZ-skenaarioita pienempi, sillä aurinkovoiman määrä ENTSO-E:n skenaarioissa on reilusti pienempi, kun taas elektrolyysereiden ja maatuulivoiman määrä suurempi. Maatuulivoiman betonin tarve vuonna 2040 on ENTSO-E-skenaariossa 10,4 Mt, kun määrä WAM:ssa on 6,6 Mt ja BIZ:ssä 7,1 Mt. Teräksen osalta ENTSO-E:n merkittävästi suurempi elektrolyysereiden kapasiteetti (29 500 MW 2040, kun WAM:ssa 2040 1 141 MW ja BIZ:ssä 2040 1 909 MW) ei silti vie kuin 105 kt terästä vuonna 2040, mutta on silti moninkertainen elektrolyysereihin tarvittavaan teräkseen WAM:ssa (4,1 kt) ja BIZ:ssä (6,8 kt).



Kuva 1a. Kumulaatiivinen perinteisten rakennusmateriaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysiteknologioihin WAM- ja BIZ-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040. Raudan osalta mukana myös sähköautojen akut.



Kuva 1b. Kumulaatiivinen perinteisten rakennusmateriaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysiteknologioihin ENTSO-E-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040.



3.2 Kriittiset materiaalit

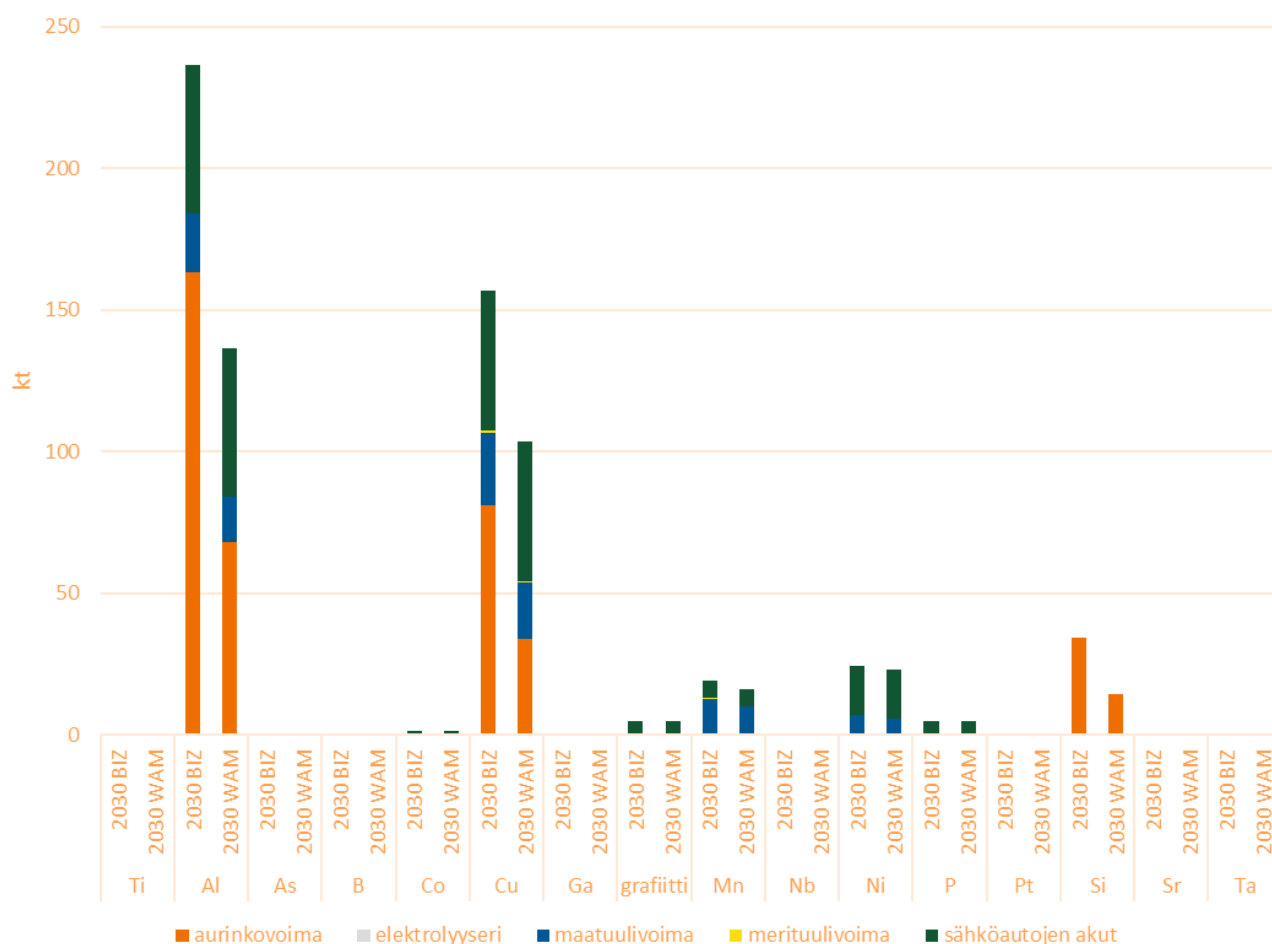
Vaikka perinteiset rakennusmateriaalit dominoivat kokonaismassaa, kriittisten metallien osuus on keskeinen energiajärjestelmän toimivuuden ja laajennettavuuden kannalta. Kriittisten materiaalien kokonaiskysyntä vaihtelee skenaarioittain merkittävästi. Vuonna 2030 BIZ-skenaariossa kulutus on noin 480 kt, ja WAM-skenaariossa noin 305 kt. Vuonna 2040 BIZ-skenaariossa kulutus on noin 1 532 kt ja WAM-skenaariossa kulutus noin 936 kt. Kasvu 2030- ja 2040-skenaarioiden välillä on huomattava kaikissa materiaaleissa. Kumulatiivisesti suurimmat kriittisten metallien tarpeet kohdistuvat alumiiniin, kupariin, nikkeliin, mangaaniin ja piihin.

Alumiini (Al) on suurin yksittäinen erä kaikissa skenaarioissa ja sen tarve kasvaa tarkastelujaksolla merkittävästi, WAM-skenaariossa vuoden 2030 noin 137 kilotonnista vuoden 2040 noin 389 kilotonniin ja BIZ-skenaariossa vuoden 2030 noin 236 kilotonnista vuoden 2040 noin 720 kilotonniin, etenkin täyssähköautojen akkujen kasvavan määrän ansiosta. Akkujen lisäksi alumiinia kuluu aurinkosähkön asennusrakenteisiin ja kaapelointeihin. Muita aurinkosähkөөn tarvittavia materiaaleja ovat etenkin kupari ja pii. Kuparin (Cu) osalta kasvu on WAM-skenaariossa vuoden 2030 noin 104 kilotonnista vuoden 2040 noin 320 kilotonniin, ja BIZ-skenaariossa vuoden 2030 noin 157 kilotonnista vuoden 2040 noin 320 kilotonniin. Kuparin käyttö on keskeistä aurinkovoiman ja täyssähköautojen akkujen lisäksi etenkin tuulivoiman generaattoreissa.

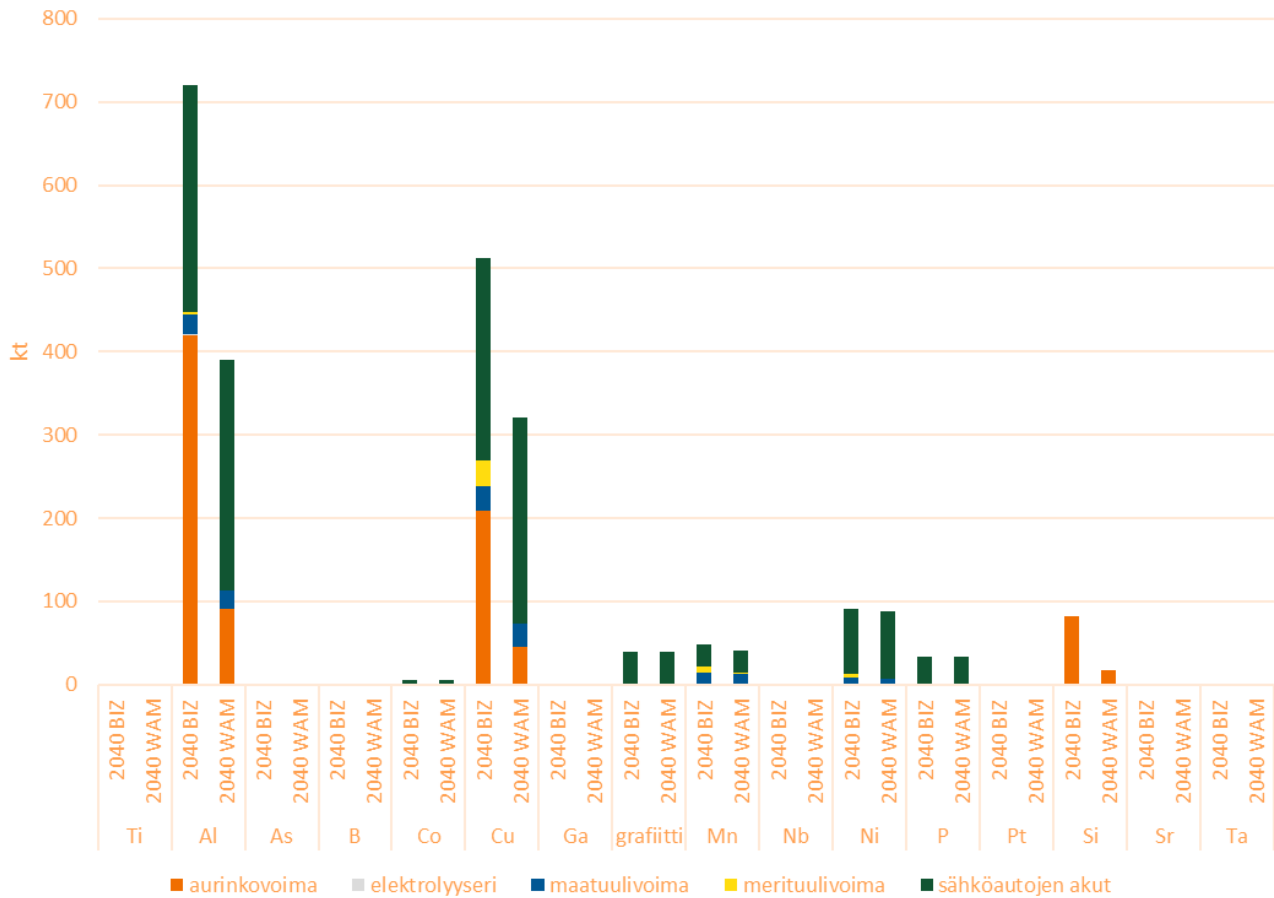
Nikkelin (Ni) kulutus kasvaa tasaisesti: 2030 BIZ 24 kt, 2030 WAM 23 kt, 2040 BIZ 91 kt, 2040 WAM 87 kt. Sitä tarvitaan etenkin täyssähköautojen akkuihin. Maatuulivoima ja sähköautojen akut jakavat mangaanin (Mn) kysynnän melko tasaisesti. Grafiitin ja fosforin (P) tarpeet lähes kymmenkertaistuvat 2030- ja 2040-skenaarioiden välillä. Lähes kaikki kulutus kohdistuu sähköautojen akkuihin. Myös kobolttia (Co) kuluu pelkästään akkuihin: 2030-skenaarioissa n. 1,3 kt kummassakin ja 2040-skenaarioissa tarve nelinkertaistuu: BIZ 5,9 kt, WAM 6,0 kt. Piin (Si) kulutus kohdistuu yksinomaan aurinkovoimaan. Platina (Pt) jakautuu elektrolyysereiden ja akkujen välille kaikissa skenaarioissa erittäin pienenä, mutta kasvavana eränä: 2030 BIZ 0,23 tonnia, 2030 WAM 0,31 tonnia, 2040 BIZ 1,09 tonnia, 2040 WAM 0,87 tonnia. Tantaali (Ta), gallium (Ga), arseeni (As), niobium (Nb) ja strontium (Sr) esiintyvät yksinomaan akuissa. Kaikkien tarpeet noin kaksinkertaistuvat 2030- ja 2040-skenaarioiden välillä: esimerkiksi tantaali 2030:ssa n. 0,088–0,089 kt ja 2040:ssa 0,481–0,487 kt. Boori (B) kohdistuu tuulivoimaan (maa ja meri) ja pysyy kaikissa skenaarioissa alle 0,04 kt.

Elektrolyysereiden osalta suurin kulutus on alumiinilla, nikkelillä ja titaanilla (Ti). Sen sijaan elektrolyysereiden materiaalitarve on tarkastelluissa skenaarioissa vain muutamia prosentteja verrattuna aurinko- ja tuulivoiman tarpeisiin. Titaanin tarve kohdistuu yksinomaan elektrolyysereihin kaikissa skenaarioissa: 2030 BIZ 0,14 kt, 2030 WAM 0,22 kt, 2040 BIZ 0,60 kt, 2040 WAM 0,36 kt. Kriittisiin materiaaleihin kuuluvat harvinaiset maametallit ovat esitelty erikseen luvussa 3.3.

Täyssähköautojen akkujen suurin materiaalitarve on kuparilla, alumiinilla ja nikkelillä. Kuparin materiaalitarve akkujen osalta kasvaa WAM-skenaariossa vuoden 2030 noin 49 kilotonnista vuoden 2040 246 kilotonniin, sekä vastaavasti alumiinin resurssikulutus kasvaa noin 52 kilotonnista noin 276 kilotonniin ja nikkelin kulutus noin 17 kilotonnista 80 kilotonniin. NMC811-akun katodiaktiivisen materiaalin pääraaka-aineet ovat nikkeli, koboltti, mangaani ja litium sekä LFP-akun rauta, fosfaatti ja litium. Litiumioniakuissa litiumin kulutus on verrattain pientä muihin pääraaka-aineisiin verrattuna, ja sen kulutuksen arvioidaan kasvavan vuoden 2030 skenaarion noin 2 kilotonnista 11 kilotonniin vuonna 2040. Akun anodin virrankeräin on valmistettu kuparista ja katodin virrankeräin alumiinista. Näiden välissä oleva nestemäinen elektrolyytti sisältää mm. litiumioneja, fosforia ja fluoria (LiPF₆). Kuparia ja alumiinia on myös akunhallintajärjestelmässä (BMS) ja akkupaketin materiaaleissa. Grafiittianodin osuus akun massasta on noin 23 %. Skenaariolaskeman NMC811-akun anodi on valmistettu synteettisestä grafiitista, jonka raaka-aineina käytetään muun muassa raakaöljyä ja kivihiiltä, ja siksi luonnon grafiitin osuus akkuminaalien materiaalitarpeesta on tässä pieni (kuvat 2a ja 2b).

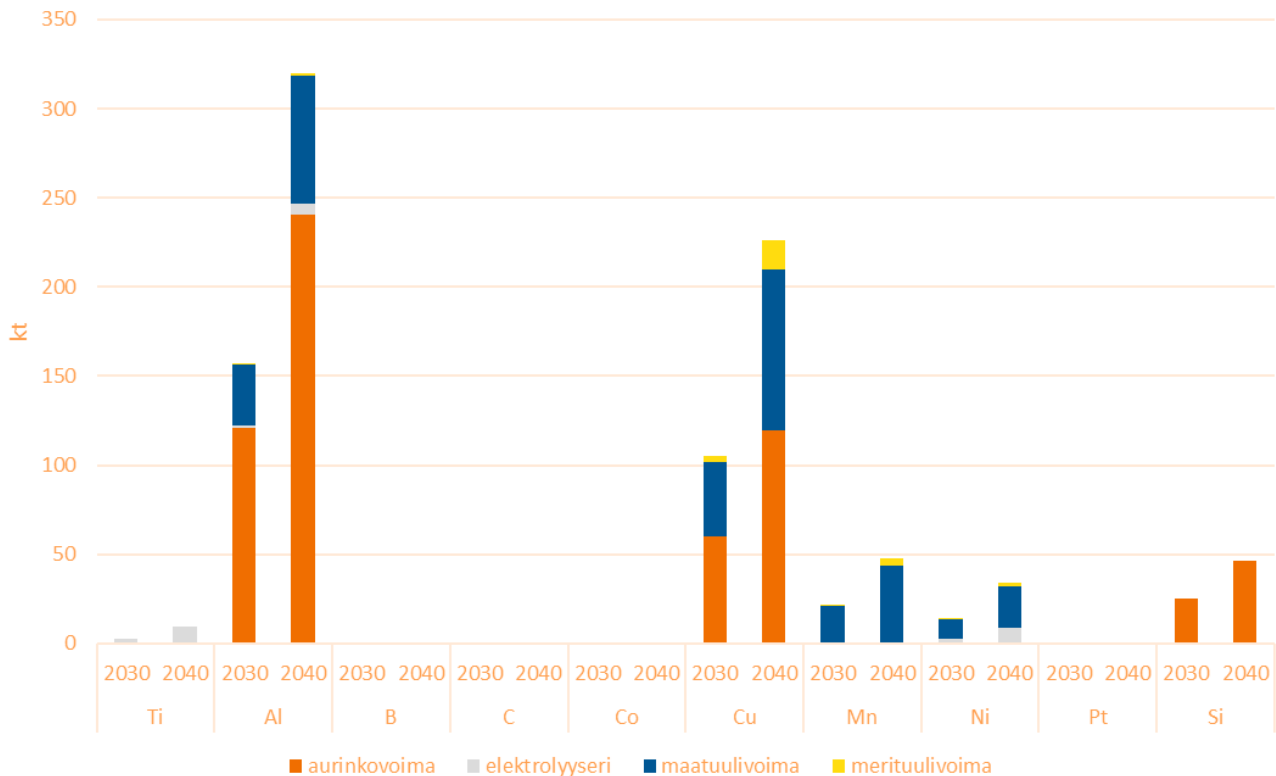


Kuva 2a. Kumulatiivinen kriittisten materiaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysi-tekologioihin sekä täyssähköautojen akkuihin vuonna 2030 WAM- ja BIZ-skenaarioissa.



Kuva 2b. Kumulatiivinen kriittisten materiaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysi-tekniikoihin sekä täyssähköautojen akkuihin vuonna 2040 WAM- ja BIZ-skenaarioissa.

Samat materiaalit korostuvat myös ENTSO-E-skenaarioissa (kuva 2c). Skenaarioita ei kuitenkaan voida suoraan verrata keskenään, sillä ENTSO-E:ssä mukana ei ole liikennettä eli täyssähköautojen akkuihin tarvittavat materiaalit eivät näy näissä luvuissa. Ilman akkujakin alumiinin, kuparin ja piin tarve on kuitenkin WAM:ssa ja BIZ:ssä suurempi, sillä niissä on enemmän aurinkovoimaa kuin ENTSO-E-skenaariossa.

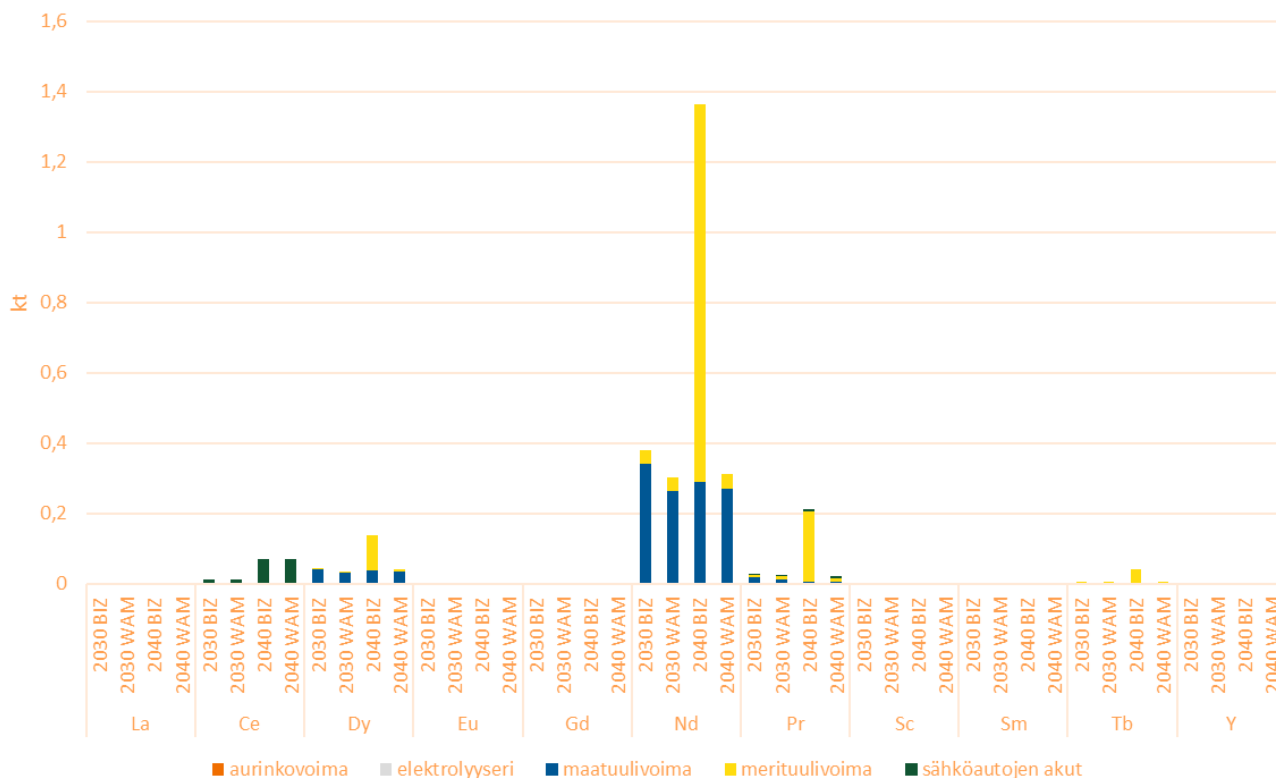


Kuva 2c. Kumulatiivinen kriittisten materiaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysi-tekniikoihin ENTSO-E-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040.

3.3 Harvinaiset maametallit

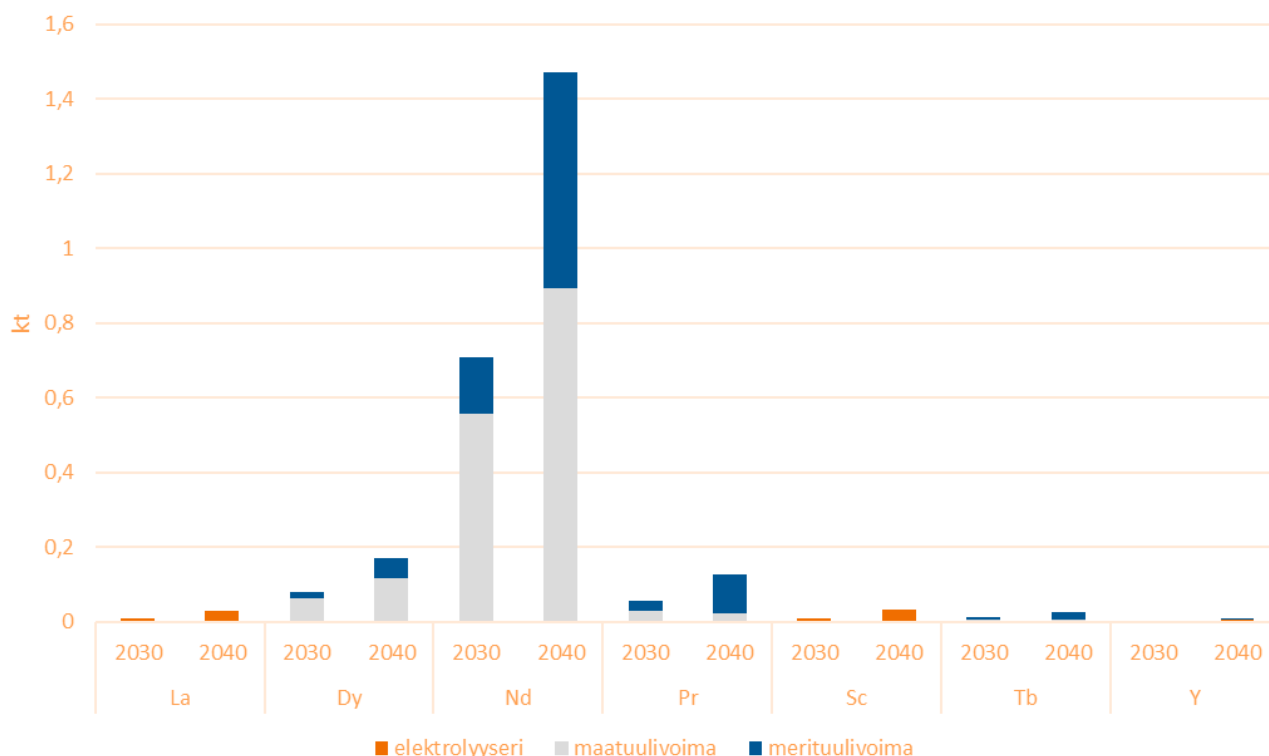
Harvinaisten maametallien (REE) absoluuttiset määrät ovat verrattain pieniä, mutta niiden merkitys korostuu teknologisen riippuvuuden ja toimitusketjujen näkökulmasta. Tarkastelussa keskeisimmät REE:t ovat neodyymi (Nd), dysprosium (Dy), praseodyymi (Pr) ja terbium (Tb). Nämä materiaalit liittyvät lähes yksinomaan kestopäätteisiin, joita käytetään maa- ja merituulivoimaloiden generaattoreissa.

Vuonna 2030 arvioitu neodyymin (Nd) tarve on WAM-skenaariossa noin 303 tonnia ja BIZ-skenaariossa noin 380 tonnia, ja se kasvaa vuoteen 2040 mennessä WAM-skenaariossa noin 314 tonniin ja BIZ-skenaariossa noin 1 364 tonniin. Dysprosium (Dy) noudattaa samaa kaavaa: 2030 BIZ 44 tonnia, 2030 WAM 34 tonnia, 2040 WAM 40 tonnia, kaikissa merituulivoiman osuus n. 4 tonnia. 2040 BIZ:ssä kokonaiskysyntä on 139 tonnia, josta merituulivoima 100 tonnia. Praseodyymi (Pr): 2030 BIZ 27 tonnia, 2030 WAM 22 tonnia, 2040 WAM 21 tonnia jakautuen maa- ja merituulivoimaan sekä pienenä määränä akkuihin. 2040 BIZ:ssä kokonaiskysyntä nousee 211 tonniin, josta merituulivoima 198 tonnia. Terbium (Tb): 2030 BIZ 6 tonnia, 2030 WAM 5 tonnia, 2040 WAM 3 tonnia. 2040 BIZ:ssä 42 tonnia, josta merituulivoima 40 tonnia. Cerium (Ce) kohdistuu yksinomaan akkuihin kaikissa skenaarioissa: 2030 BIZ ja WAM kumpikin 14 tonnia, ja 2040 kumpikin 71 tonnia. Vaikka osa materiaaleista ei näy kuvissa, niiden tarve ei silti ole olematon. Skandiumia (Sc) tarvitaan yksinomaan elektrolyysereihin: 2030 BIZ 0,52 tonnia, 2030 WAM 0,80 tonnia, 2040 BIZ 2,20 tonnia, 2040 WAM 1,31 tonnia. Lantaani (La) samoin yksinomaan elektrolyysereihin hyvin pieninä määrinä kaikissa skenaarioissa (0,45–1,91 tonnia). Yttrium (Y) kohdistuu pääosin elektrolyysereihin, mutta pieninä määrinä myös merituulivoimaan Europium (Eu), gadolinium (Gd) ja samarium (Sm) esiintyvät yksinomaan akuissa kaikissa skenaarioissa alle 1 tonnin määrinä, kuitenkin kaksinkertaistuen 2030- ja 2040-skenaarioiden välillä (kuva 3a).



Kuva 3a. Kumulatiivinen harvinaisten maametallien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysiteknologioihin sekä täyssähköautojen akkuihin WEM- ja WAM-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040.

Samat materiaalit korostuvat myös ENTSO-E:n kuvaajassa (kuva 3b), josta jälleen kuitenkin puuttuu sähköautojen akut, joten eri materiaalien määrät ovat pienemmät. Neodyymin (Nd), dysprosiumin (Dy), praseodyymin (Pr) ja terbiumin (Tb) määrät ovat tässä vielä korkeampia tuulivoiman määrän ollessa suurempi.

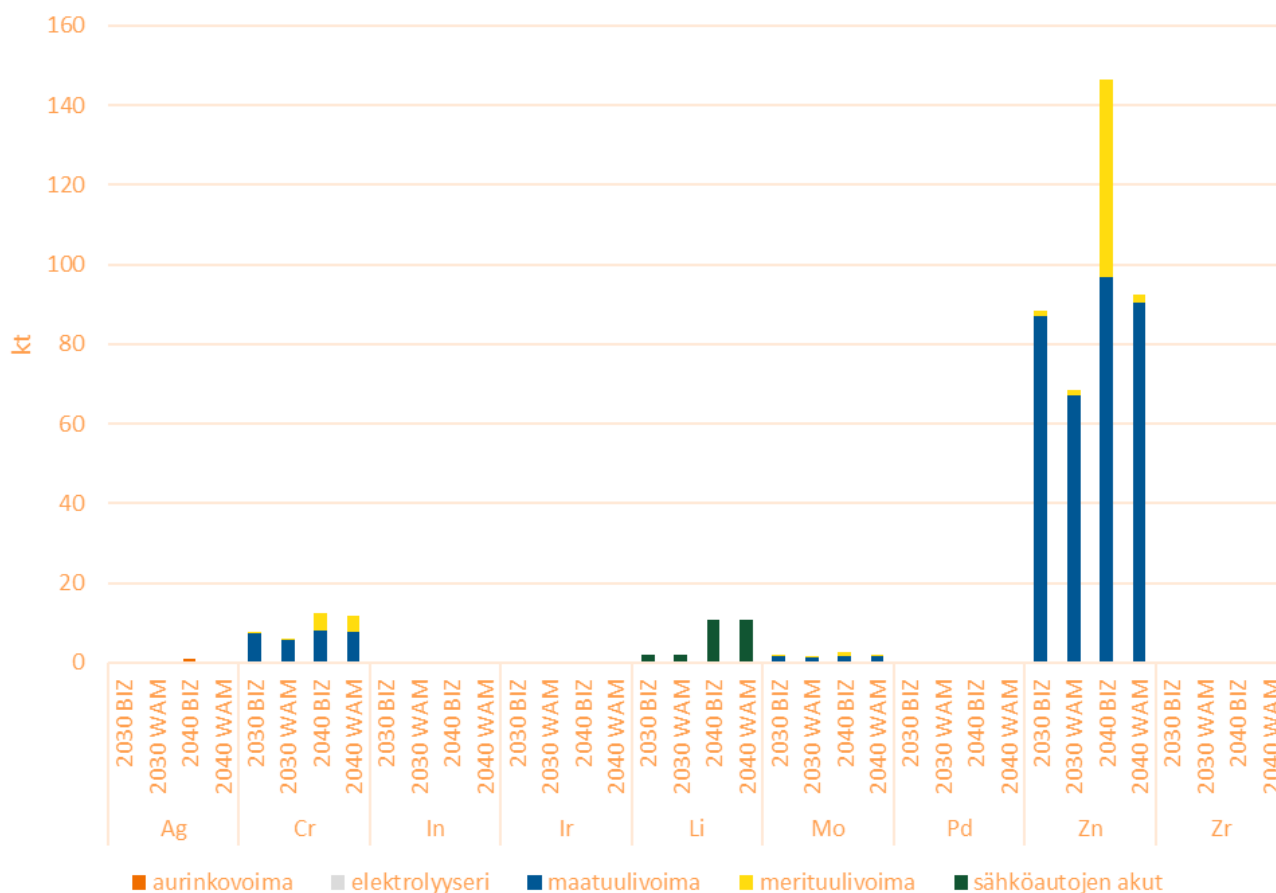


Kuva 3b. Kumulatiivinen harvinaisten maametallien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysiteknologioihin ENTSO-E-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040.

3.4 Muut materiaalit

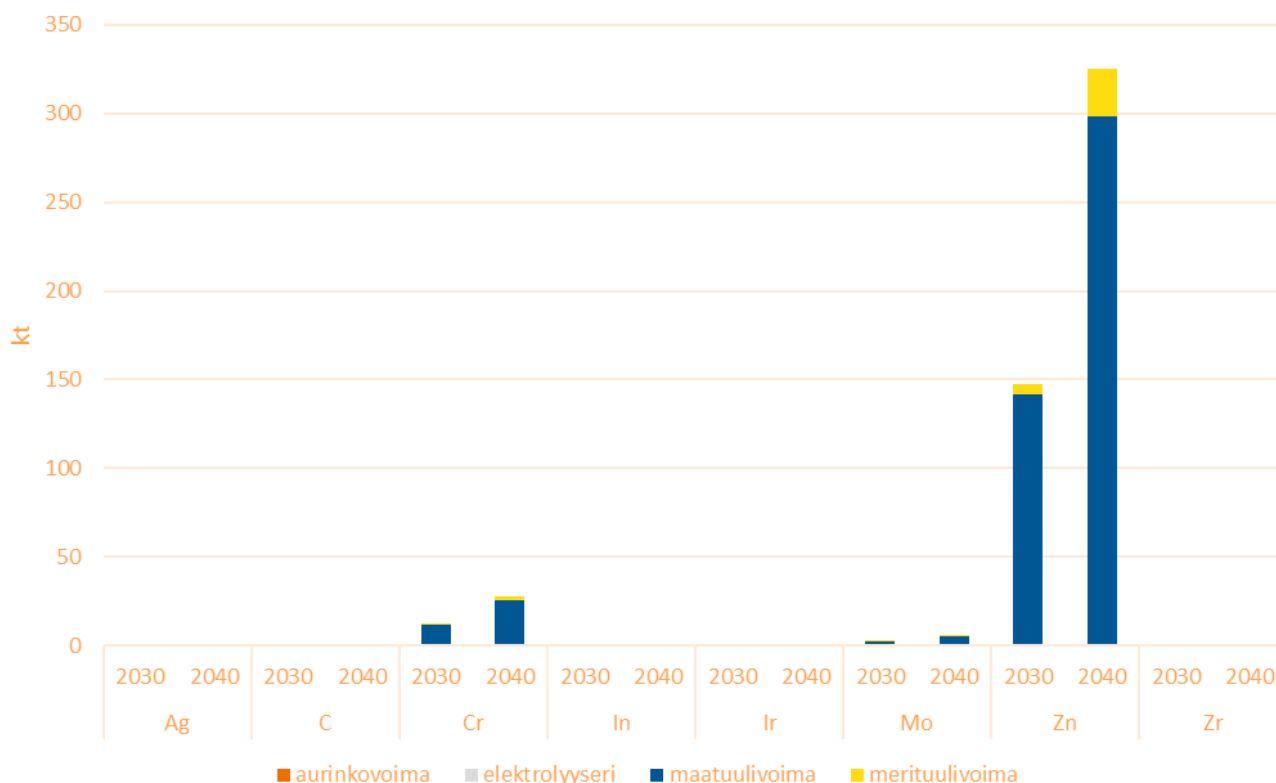
Kuvassa 4a on esitelty muiden kuin kriittisten alkuaineiden tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysiteknologioihin vuosina 2030 ja 2040. Näistä merkittävin määrä on sinkillä (Zn), jota käytetään etenkin tuulivoimaloiden tornien galvanisointiin ja tarvittavat määrät ovat suuria. Sinkin tarve kasvaa WAM-skenaariossa noin 68 kilotonnista vuonna 2030 noin 93 kilotonniin vuonna 2040 ja BIZ-skenaariossa noin 88 kilotonnista noin 147 kilotonniin.

Myös kromin (Cr) kysyntä kohdistuu yksinomaan tuulivoimaan. 2030 BIZ 7,5 kt, 2030 WAM 5,8 kt, 2040 WAM 11,8 kt. Molybdeenin (Mo) noudattaa samaa kaavaa: 2030 BIZ 1,6 kt, 2030 WAM 1,3 kt, 2040 WAM 1,7 kt. Litiumin (Li) kysyntä kohdistuu vain akkuihin: 2030 BIZ 2,0 kt, 2030 WAM 2,0 kt, 2040 BIZ 10,8 kt, 2040 WAM 10,9 kt; lähes viisinkertaistuen 2030- ja 2040-skenaarioiden välillä. Hopean (Ag) ja indiumin (In) kysynät kohdistuvat yksinomaan aurinkovoimaan. 2040 BIZ:n hopean tarve (0,86 kt) on lähes viisinkertainen WAM-skenaarioon verrattuna. Indiumia tarvitaan 2030 BIZ 6,8 tonnia, 2030 WAM 2,8 tonnia, 2040 BIZ 61 tonnia, 2040 WAM 13 tonnia. Zirkoniumin (Zr) ja iridiumin (Ir) kysynät kohdistuvat molemmat yksinomaan elektrolyysereille. Zr: 2030 BIZ 17 tonnia, 2030 WAM 26 tonnia, 2040 BIZ 71 tonnia, 2040 WAM 42 tonnia. Iridiumin kysyntä on absoluuttisesti pienin erä tarkastelussa (2030 BIZ 0,20 tonnia, 2030 WAM 0,31 tonnia, 2040 BIZ 0,86 kt, 2040 WAM 0,51 tonnia), mutta alkuaineen globaalien reservien niukkuus tekee siitä strategisesti merkittävän. Palladiumin (Pd) kysyntä liittyy yksinomaan akkuteknologioihin kaikissa skenaarioissa: 2030 BIZ ja WAM kumpikin 0,16 kt, 2040 BIZ 0,81 kt ja 2040 WAM 0,823 kt.



Kuva 4a. Muiden materiaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyyseriteknologioihin sekä täyssähköautojen akkuihin WEM- ja WAM-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040.

Suurempi tuulivoiman määrä näkyy ENTSO-E:n skenaarioissa yli kaksinkertaisena määränä esimerkiksi sinkin ja kromin kulutuksessa (kuva 4b).

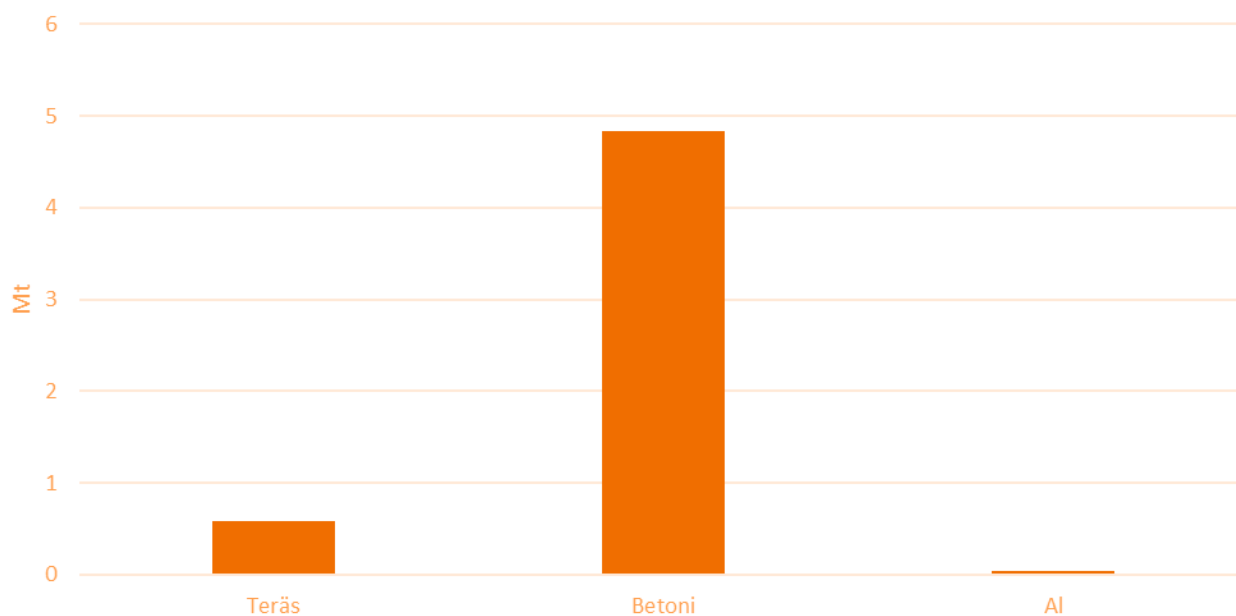


Kuva 4b. Muiden materiaalien tarve tuulivoima-, aurinkovoima- ja elektrolyysiteknologioihin ENTSO-E-skenaarioissa vuosina 2030 ja 2040.

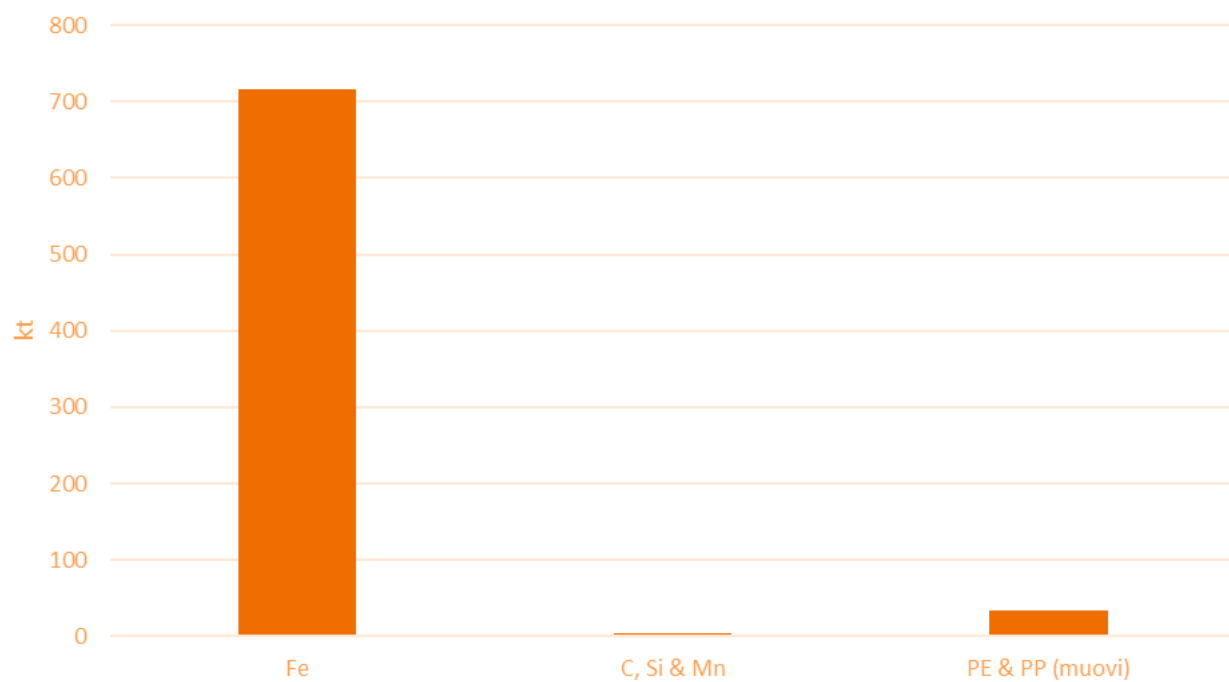
3.5 Sähkö- ja vetyverkot

Sähkön kantaverkon vahvistaminen (400 kV AC, noin 4200 km) edellyttäisi arviolta 0,58 miljoonaa tonnia terästä, 4,83 miljoonaa tonnia betonia ja noin 0,046 miljoonaa tonnia alumiinia. (Fingrid, 2025) Nämä määrät ovat verrattavissa yksittäisten tuotantoteknologioiden materiaalivirtoihin ja osoittavat, että infrastruktuurin rooli materiaalikysynnässä on keskeinen (kuva 5). Jakeluverkon laajentamiseen tarvittavia määriä ei tässä arvioitu, mutta niiden merkitys kokonaiskuvaan voidaan olettaa myös merkittäväksi.

Suunnitellun noin 1500 kilometrin vetyverkoston materiaalitarpeet ovat massaltaan pienemmät (Kuva 6). Verkko edellyttäisi arviolta 716 tonnia rautaa, 3,6 tonnia seosaineita (C, Si, Mn) sekä noin 34 tonnia polymeerimateriaaleja (PE/PP). (Hacklin, 2025)



Kuva 5. Materiaalitarve sähkön kantaverkon vahvistamiselle 2040 mennessä.



Kuva 6. Materiaalitarve 1500 km vetyputkistolle.



3.6 Geoenergia (maalämpöpumput)

Geoenergian laajempialainen kehitys alkoi Suomessa 1970-luvun puolenvälin jälkeen, jolloin maalämpöpumppuja alettiin ottamaan käyttöön. Maalämpöpumput yleistyivät siten, että 1980-luvun alussa lämpöpumppuja asennettiin n. 2000 kappaletta vuosittain. Kuitenkin 1980-luvun puolessa välissä lämpöpumppujen asentaminen väheni huomattavasti. Maalämpöpumput alkoivat yleistymään uudestaan 2000-luvun ensimmäinen vuosikymmenen puolivälistä, jonka jälkeen kasvu on ollut nopeaa. Eniten maalämpöpumppuja myytiin vuonna 2011, jolloin niitä asennettiin 13 941 kappaletta. Vuonna 2024 Suomeen oli asennettu arviolta 202 460 kappaletta maalämpöpumppuja.

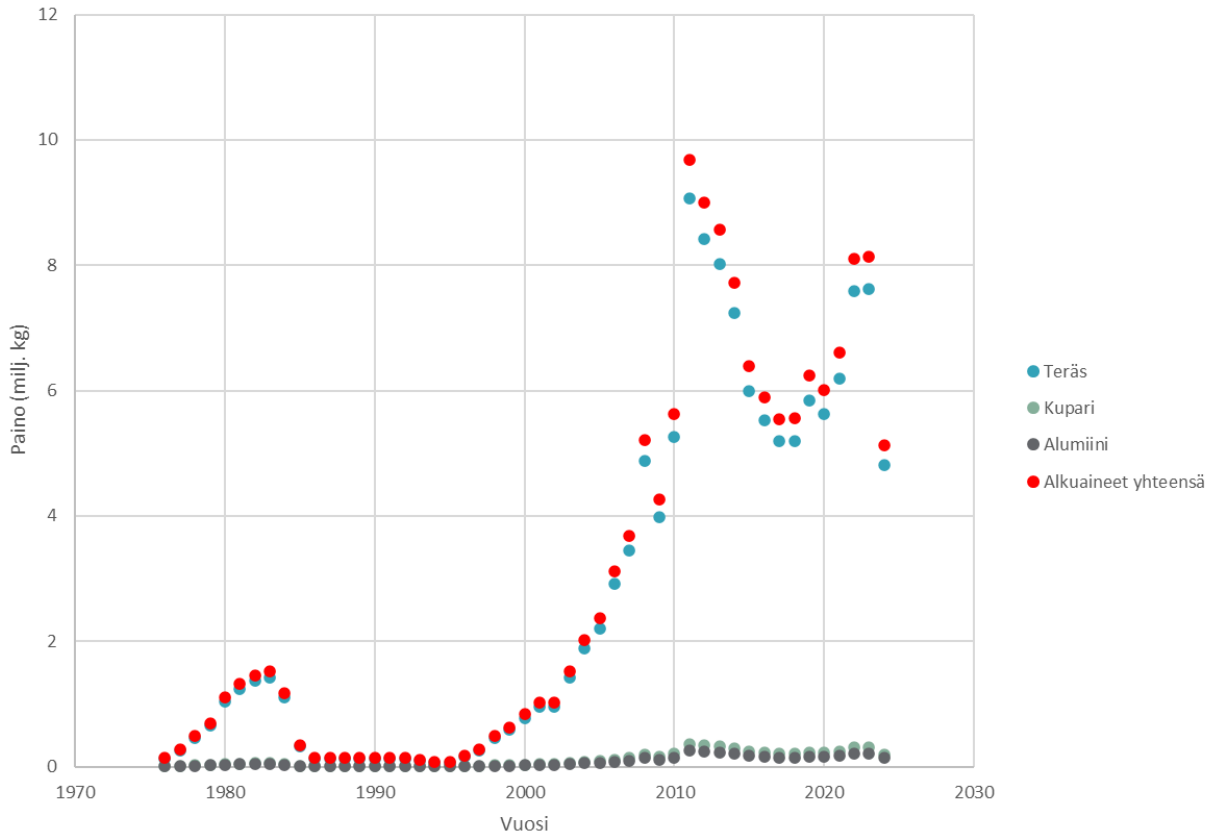
Tärkeimmät lämpöpumpuissa tarvittavat metallit ovat teräs, kupari ja alumiini. Lämpöpumppuja on useita kymmeniä eri kokoluokan ja erilaisia malliratkaisuja, joten tarkkoja raaka-ainetarpeita ei voida arvioida. Lisäksi useista pumppumalleista ei ole olemassa julkista tietoa raaka-ainemääristä. Tässä raaka-ainearvio perustui kolmeen lämpöpumppumallista saatavilla olevaan tietoon: Gebwell a) Taurus 80 EVI (teräs: 608,2 kg, kupari: 19,3 kg, alumiini: 14,1 kg), b) Taurus 110 EVI (teräs: 606,4 kg, kupari: 19,4 kg, alumiini: 14,2 kg) ja c) Taurus Inverter PRO (teräs: 688,9 kg, kupari: 32,7 kg, alumiini: 22,4 kg).

Lämpöpumppujen myyntimäärien ja käytettävien raaka-ainetietojen perusteella arvioitiin, että keskimääräisesti vuodesta 2010 eteenpäin maalämpöpumppuihin on kulunut vuosittain terästä 6503 t, kuparia 260 t ja alumiinia 185 t. Vuodesta 2002 vuoteen 2024 energian määrä maalämpöpumpuista on kymmenkertaistunut ja vuonna 2024 energiaa saatiin noin 10,8 TWh. Nykyisin yhden maalämpöpumpun keskimääräinen teho on 12–15 kW. Tuotettujen tehoarvojen ja käytettyjen raaka-ainemäärien perusteella voidaan arvioida maalämpöpumppujen teho-raaka-ainesuhteen olevan seuraavat:

- Teräs: 43 333 – 54 167 kg/MW
- Kupari: 1 733 – 2 167 kg/MW
- Alumiini: 1 233 – 1 542 kg/MW

Maalämpöpumppujen kasvuskenaariot perustuvat Suomen lämpöpumppuyhdistyksen (Sulpu) keräämiin myyntitilastoihin vuodesta 1976 lähtien, SULPU, Suomen kaivonporausurakoitsijoiden (Poratek ry), European heat pump associationin (ehpa) sekä GTK:n asiantuntijoiden arvioon geoenergiamarkkinoiden kehityksestä Suomessa ja Euroopassa. Maalämpöpumpuilla tuotetun lämmitysenergian määrä on kasvanut vuosittain noin 500 GWh.

Maalämpöpumppujen raaka-aineiden kulutus seuraa geoenergian yleistä markkinakehitystä ja siksi se on hyvin vaihtelevaa (kuva 7). Jos oletetaan keskimääräisen kasvun jatkuvan samanlaisena tulevaisuudessa, vuosittainen maalämpöpumppujen kuparin tarve on n. 263 t, teräksen tarve on n. 6566 t ja alumiinin tarve n. 185 t (oletuksena nykyisin tarvittavat raaka-ainemäärät). Kumulatiivisesti tarkasteltuna materiaalit tarpeet kasvavat kuitenkin merkittävästi: vuoteen 2030 mennessä maalämpöpumppuihin tarvitaan kuparia yhteensä 6,8 kt, alumiinia 4,9 kt ja terästä 170,3 kt. Vuoteen 2040 mennessä tarpeet kasvavat edelleen: kuparia 9,4 kt, alumiinia 6,7 kt ja terästä 235,3 kt.



Kuva 7. Maalämpöpumppujen vuosittaiset teräksen, kuparin ja alumiinin tarve Suomessa vuosina 1976–2024.

Geoenergian kehityksen kannalta raaka-aineiden kulutusmäärät ovat pienet suhteessa niiden tuotantoon Suomessa. Keskimääräisesti tuotantoon nähden kuparia on kulunut maalämpöpumppuihin 5 vuoden jakson aikana 0,73 % ja terästä vastaavasti 0,18 %. Suhteellinen tuotanto riippuu niin tarvittavasta raaka-ainemäärästä kuin tuotannon muutoksista. Siksi esimerkiksi vuonna 2022 kuparia kului maalämpöpumppuihin n. 1,1 % Suomen tuotannosta.

4. Kierrätysmahdollisuudet

Raportissa tarkasteltujen teknologioiden käytön aikaiset päästöt ovat usein pieniä verrattuna fossiilisiin vaihtoehtoihin, mutta niiden nopea käyttöönotto kasvattaa mineraalien, metallien, polymeerien, komposiittien ja erikoismateriaalien kysyntää. Kiertotalouden merkitys liittyykin yhtä aikaa jätevirtojen hallintaan, materiaaliturvallisuuteen, arvon säilyttämiseen ja ympäristövaikutusten vähentämiseen (IRENA and IEA-PVPS, 2016; Li ym. 2022; Kamran ym. 2023; Greenwald ym. 2024).

Teknologioiden välillä on suuria eroja sekä materiaalien että kierrätysaasteiden suhteen. Tuuli-voimassa ja sähköverkoissa suurin massa on terästä, betonia, kuparia ja alumiinia, joille on olemassa vakiintuneita kierrätysmarkkinoita; haasteita tuottaa harvinaisten maametallimagneettien, lapakomposiittien ja perustusten laadukas käsittely. Aurinkopaneeleissa lasi ja alumiini hallitsevat massaa, mutta arvo ja kriittisyys voivat olla pienissä määrissä mm. hopeaa, piitä, indiumia. Aurinkopaneelien jätevirrat ovat toistaiseksi pieniä, koska pitkäikäiset tuotteet tuottavat jätettä viiveellä suhteessa asennusten kasvuun. Siksi keräys- ja kierrätysjärjestelmät olisi rakennettava ennen kuin jätevolyymit kiihtyvät voimakkaasti. Akuissa arvokkaita kohteita ovat erityisesti koboltti, nikkeli, kupari ja litium, kun taas grafiitti, elektrolyytit, sideaineet ja muovit jäävät usein heikommin



talteen. Elektrolyysereissä kriittisyys keskittyy erityisesti PEM-teknologioiden platinaryhmän metalleihin ja titaaniin, kun taas alkalinen ja AEM-teknologia pyrkivät vähentämään jalometalli-riippuvuutta (Tao ym. 2020; Neumann ym. 2022; Kiemel ym. 2021; Mirlitz ym. 2023; Eikeng ym. 2024; Li ym. 2025)

Taulukkoon 3 on koottu lyhyt tiivistelmä eri teknologioiden kiertotalousmahdollisuuksista. Liitteessä 2 on kuvattu tarkemmin eri teknologioiden käyttöönoton ja kiertotalouden haasteet, materiaali- ja -kriittisyydet, nykyinen kierrätys, tekninen talteenottopotentiaali, vaikeimmat fraktiot, taloudelliset ja poliittiset ehdot sekä kokonaisarviot kiertotalouspotentiaalista.

Taulukko 3 Tiivistetty vertailu eri teknologioiden materiaaleista, nykyisestä kierrätyksestä, vaikeimmista fraktioista ja vahvan kiertotalouden pianopisteistä.

Teknologia	Kriittiset / strategiset materiaalit	Nykyinen kierrätys	Vaikeimmat fraktiot	Vahvan kiertotalouden painopiste
Aurinkosähkö	c-Si: pii, hopea, kupari, lyijyjuute; CdTe: telluuri ja kadmium; CIGS: indium, gallium, seleeni; perovskiiitit: lyijy ja ITO (Tao ym. 2020; Buonomenna, 2023).	Alumiini, ulkoinen kupari ja lasi palautuvat parhaiten; kriittisten ohutkalvo- ja solumateriaalien talteenotto on epätasaisempaa (IEA PVPS, 2025).	EVA (Etyleeni-Vinyyli Asetaatti levy), taustalevyt, ohuet absorberikerrokset, pienipitoiset metallit, lyijy/kadmium.	Keräys ennen jätepiikkiä, kalvojen erottelu (delamination), materiaali-kohtainen talteenotto, uudelleenkäyttö, turvallinen haitta-ainehallinta.
Tuulivoima	Teräs, betoni, kupari, alumiini; NdFeB-magneeteissa Nd, Pr, Dy, Tb; lavoissa GFRP/CFRP-komposiitit (Li ym. 2022; Pavel ym. 2017).	Metallit kiertävät parhaiten; lavat ja magneetit heikommin; massaperusteinen 85-90 % kierrätys ei kuvaa arvon säilymistä (Paulsen and Enevoldsen, 2021).	Termosettilavat, upotetut magneetit, merituulivoiman perustukset, pinnoitteet, elektroniikka.	Käyttöiän pidentäminen, uudelleentehostaminen (repowering), komponenttien uudelleenkäyttö, magneettien jäljitettävyyden, lapojen korkeamman arvon hyödyntäminen.
Sähköverkot	Kupari, alumiini, teräs, betoni, eristeet; elektroniikassa pieniä määriä jalometalleja ja CRM-materiaaleja (Chen ym. 2022; Efstratiadis and Michailidis, 2022).	Puhtaat metalliromut kiertävät hyvin; monimateriaalikomponentit, kaapelit, pinnoitteet ja eristeet heikentävät laatua.	Ristisilloitetut polymeerit, pinnoitteet, seosaineiden kontaminaatio, epäpuhtaudet ja pitkät käyttöiät.	Kierrätykseen suunnittelu, materiaali-passit, romun laadunhallinta, erotettavat liitokset, romun epäpuhtauksia paremmin sietävät seokset (scrap-tolerant alloys).
Akut	Li, Co, Ni, Mn, grafiitti, Cu, Al; LFP vähentää Co/Ni-riippuvuutta mutta heikentää taloudellista kierrätyskannustinta (Neumann ym. 2022).	Pyro- ja hydrometallurgia palauttavat Co/Ni/Cu ja kasvavasti Li; grafiitti, elektrolyytit, sideaineet ja muovit jäävät usein heikommin talteen.	Sekalaiset kemiat, paloriski, pakkausdesign, alhainen keräys, vähäkoboltisten kemioiden kannattavuus.	Korkea keräysaste, akkupassit, turvallinen logistiikka, toisen eliniän sovellukset, standardointi, suora kierrätys.
Elektrolyysarit	AEL/AEM: teräs ja Ni; PEM: Pt, Ir/Ru, Ti ja PFSA-kalvot; SOEC: Ni, YSZ, keraamit (Kiemel ym. 2021; Eikeng ym. 2024).	AEL: metallien talteenotto; PEM: PGM-talteenotto kehittynyt; SOEC ja AEM vielä varhaisempia kokonaisvaltaisessa kierrätyksessä.	Fluoratut kalvot, MEA-rakenteet, kennopinojen eli stack-rakenteiden vaihtelu, keraami-metallierottelu, Ir-saatavuus.	PGM-kuormien minimointi, erityisesti iridiumin korkea elinkaaren lopun talteenotto, standardoidut kennopinot eli stack-rakenteet, ei-jalometallikatalyytit, kierrätykseen suunnittelu.



5. Tulosten tarkastelua

5.1 Kriittisten ja strategisten materiaalien kulutus kasvaa - kiertotalouden ratkaisuja tarvitaan

Tulokset osoittavat, että uusiutuvan energiantuotannon ja siihen liittyvän infrastruktuurin määrällisesti suurimmat materiaalit tarpeet kohdistuvat perinteisiin rakennusmateriaaleihin. Teräs ja betoni muodostavat ylivoimaisesti suurimmat materiaali virrat. Tästä huolimatta energiajärjestelmän toimivuuden ja laajennettavuuden kannalta keskeisin kysymys liittyy kriittisten ja strategisten materiaalien saatavuuteen, joita tarvitaan puhtaiden energiateknologioiden ja siihen liittyvän infrastruktuurin valmistuksessa.

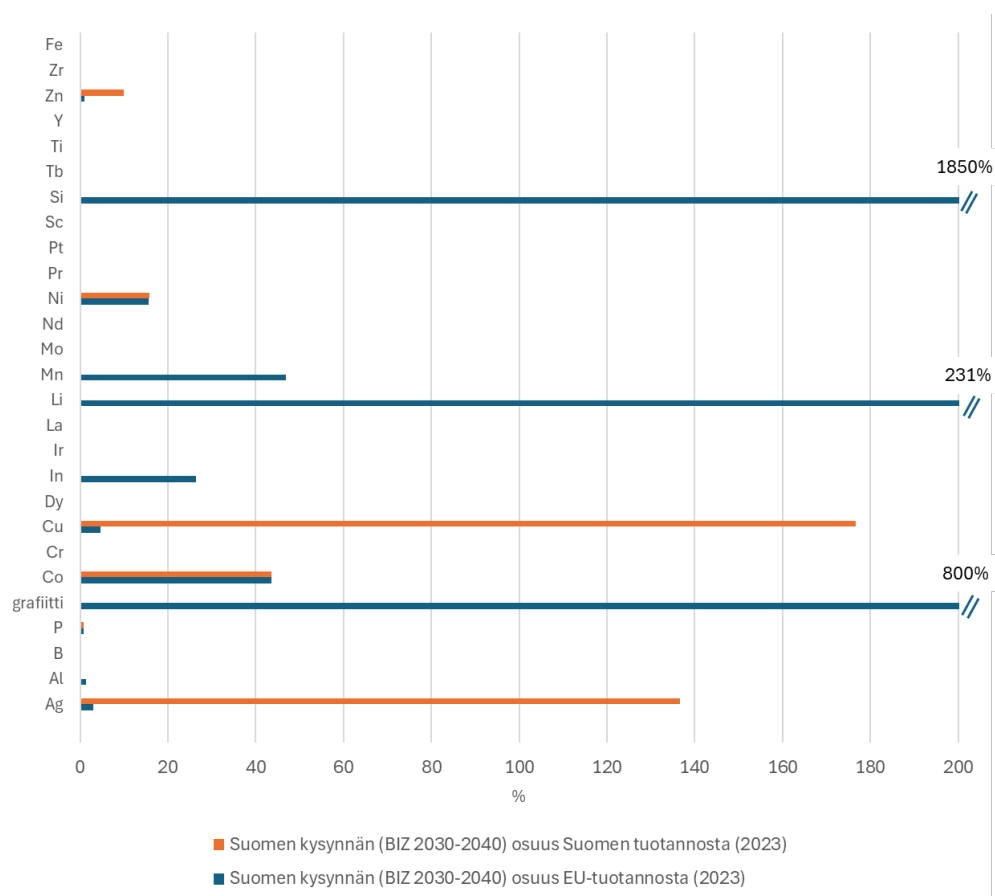
Eryityisesti alumiini, kupari, nikkeli, mangaani ja pii nousevat Suomea koskevissa skenaario-tarkastelussa keskeisiksi kriittisiksi materiaaleiksi, sillä niiden käyttö on laaja-alaista useissa energiateknologioissa ja niiden kysyntä kasvaa merkittävästi vuosien 2030 ja 2040 välillä. Harvinaiset maametallit (erityisesti Nd, Dy, Pr ja Tb) esiintyvät absoluuttisesti pieninä määrinä energiateknologioissa, mutta niiden merkitys on suuri, koska ne liittyvät keskeisiin komponentteihin, erityisesti tuulivoimaloiden kestopagneetteihin, ja niiden toimitusketjut ovat geopolittisesti keskittyneitä ja haavoittuvia.

Kiertotalouden osalta kaikkien tarkasteltujen teknologioiden yhteinen johtopäätös on, että tekninen kierrätettävyyden ei vielä tarkoita toteutunutta kiertotaloutta. Massaperusteinen kierrätys voi antaa liian myönteisen kuvan, jos strategiset, arvokkaat tai haitalliset materiaalit jäävät ottamatta talteen. Siksi materiaalien takaisinkierrossa tulisi erottaa vähintään kolme tasoa: massan talteenotto, kriittisten materiaalien talteenotto ja laadun säilyminen. Lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä kierrätys vähentää jätettä ja parantaa resurssitehokkuutta, mutta se ei poista primäärimateriaalien tarvetta, koska teknologioiden käyttöönotto kasvaa nopeammin kuin elinkaaren loppuun tulevat materiaali virrat. Tämä pätee erityisesti aurinkosähköön, tuulivoimaan, akkuihin ja elektrolyysereihin, joissa suuri osa asennetusta kapasiteetista ei ole vielä saavuttanut käyttöikänsä loppua (IRENA and IEA-PVPS, 2016; Li ym. 2022; Baars ym. 2020; Kiemel ym. 2021).

Vahvin kiertotalouspolku yhdistää materiaalitehokkuuden, käyttöiän pidentämisen, korjauksen, uudelleenkäytön, toisen eliniän sovellukset, suunnitellun purkamisen, jäljitettävyyden, korkean keräysasteen, materiaali kohtaisen talteenoton ja markkinat laadukkaille sekundaarimateriaaleille. Kiertotalouden onnistuminen ei siksi ole vain teknologinen kysymys, vaan myös suunnittelu-, politiikka-, infrastruktuuri- ja markkinakysymys.

5.2 Vertailu kotimaiseen ja EU:n kaivostuotantoon

Lopuksi kriittisten ja strategisten raaka-aineiden tarvetta energiasiirtymässä verrataan Suomen ja EU:n kaivostuotantoon. 8 esittää Suomen 2030–2040 vuosittaisen energiateknologioiden materiaalikulutuksen osuuden verrattuna raaka-aineiden arvioituun kaivostuotantoon Suomessa ja Euroopassa vuonna 2030. Tuotantomäärät ja kysyntä on listattu tarkasti Taulukossa 4. Piin, litiumin ja grafiitin osalta EU:n kysyntä pelkästään Suomen energiasiirtymän tarpeisiin ylittää huomattavasti EU:n kaivostuotannon. Useita tarvittavia raaka-aineita ei myöskään tuoteta lainkaan EU:ssa tai Suomessa.



Kuva 8. Vuosittaisen energiateknologioiden raaka-ainekulutuksen (2030–2040) osuus Suomen ja EU:n 2023 kaivostuotannosta.



Taulukko 4. Raaka-aineiden kaivostuotanto Suomessa ja EU:ssa, sekä raportissa tarkastellun mukainen energiateknologioiden materiaalikysyntä Suomessa 2030–2040. Harmaalla korostettuja raaka-aineita ei tuoteta lainkaan Suomessa eikä EU:ssa.

Raaka-aine	Kaivostuotanto Suomessa 2023* (kt)	Kaivostuotanto EU:ssa 2023* (kt)	Vuosittainen kysyntä uusiutuviin energiateknologioihin Suomessa 2030–2040 (kt)
Ag	0,04	2,04	0,06
Al (bauksiitti)	-	1109,60	15,5
B	-	-	0,003
P (Fosfaattikivi P2O5)	330,71	330,71	2,81
C (grafiitti)	-	0,44	3,49
Co	1,06	1,06	0,46
Cr	376,39	376,39	0,49
Cu	20,13	778,19	35,82
Dy	-	-	0,01
Fe	-	20236,11	29,45
In	-	0,04	0,01
Ir	-	-	0,00007
La	-	-	0,0001
Li	Kaustisen litiumkaivos avattiin 2026	0,38	0,88
Mn	-	6,25	2,93
Mo	-	-	0,11
Nd	-	-	0,1
Ni	41,94	42,69	6,65
Pr	-	-	0,02
Pt	0,0009	0,0009	0,00009
Sc	-	-	0,0002
Si**	-	0,25	4,7
Tb	-	-	0,004
Ti	-	-	0,05
Y	-	-	0,00009
Zn	58,39	639,22	5,82
Zr	-	-	0,01

*(World Mining data, 2025)

**Yhdistetty Ferrosilicon ja Silicon metal -jalostustuotanto (USGS, 2025)

Suomen raaka-ainetuotannon merkitys EU:n energiasiirtymässä korostuu erityisesti niissä metalleissa ja mineraaleissa, joissa EU:n oma tuotanto on niukkaa, mutta Suomessa on sekä kaivoksia että jalostus- ja sulattokapasiteettia. EU:n kannalta oleellinen lisäarvo syntyy siitä, että Suomessa ei ainoastaan louhita malmia, vaan tuotanto kytkeytyy pitkälle vietyihin arvoketjuihin: raaka-aineita voidaan rikastaa, jalostaa ja osin myös sulattaa lähellä esiintymää, mikä vähentää



toimitusketjuriskejä ja nostaa eurooppalaista omavaraisuutta. EU:n kannalta Suomen rooli näkyy selvästi mm. kromissa (EU:n ainoa kromikaivos) sekä fosforissa (EU-alueen ainoa fosfaattikaivos).

Tässä raportissa tarkastelluista raaka-aineista Suomessa tuotetaan hopeaa, fosforia, kobolttia, kromia, kuparia, nikkeliä, litiumia, platinaa ja sinkkiä (taulukko 3). Näistä useissa raaka-aineissa Suomi on EU:n ainoa tai keskeisimpiä tuottajia, kuten esimerkiksi platinassa, koboltissa, fosforissa ja kromissa. Koboltin osalta Suomen merkitys korostuu erityisesti jalostuksessa: Kokkolan jalostuskapasiteetti on eurooppalaisittain poikkeuksellinen ja kuuluu maailman suurimpiin Kiinan ulkopuolella. Lisäksi Suomessa on merkittävästi nikkelin jalostuskapasiteettia, ja tuotantoa tehdään myös Suomeen muualta tuotavista raaka-aineista. Nornickel Harjavalta kuuluu suureen venäläiseen metalli- ja kaivosalan Nornickel-konserniin ja nikkelin jalostus Suomessa perustuu edelleen venäläisen nikkelimalmin tuontiin, joka ei ole toistaiseksi EU:n pakotelistalla.

Tulevaisuudessa Suomessa voidaan tuottaa lisäksi useita muita tarkasteltuja raaka-aineita ja ennen kaikkea laajentaa EU:lle tärkeää jalostavaa kapasiteettia. Vuonna 2026 Suomessa käynnistyi Keliberin litiumkaivostoiminta (Kaustinen) ja samalla litiumarvoketju kohti akkukäyttöön soveltuvaa litiumhydroksidia etenee jalostuslaitoksen kautta, mikä vahvistaa EU:n omia litiumtuotantoketjuja. Suhangon kaivosprojektin tullessa tuotantoon platinametallien tuotanto on myös kasvamassa merkittävästi. Suomesta tunnetaan lisäksi esiintymiä mm. grafiitin ja harvinaisten maametallien (REE) osalta, ja erityisesti Soklin esiintymä on nostettu esiin Euroopan mittakaavassa merkittävänä sekä fosfaatin että harvinaisten maametallien lähteenä. Suomen kallioperä mahdollistaa monien raaka-aineiden tuotannon, mutta EU:n näkökulmasta Suomen strateginen etu on yhä selvemmin siinä, että louhinta voidaan kytkeä kotimaiseen jalostukseen ja edelleen eurooppalaisiin arvoketjuihin juuri niissä materiaaleissa, jotka EU on tunnistanut kriittisiksi ja strategisiksi energiasiirtymän kannalta.

Kaivostoiminnan käynnistäminen on kuitenkin hidas prosessi, mikä voi luoda painetta nopeuttaa resurssien saatavuutta avaamalla kaivoksia maissa, joissa sääntely on heikompaa. Kaivosten toiminnalla ja jatkojalostuksella on moninaisia ympäristövaikutuksia muun muassa maankäyttöön, biodiversiteettiin, vesistöihin ja ilmanpäästöihin materiaalityönsä nopean kasvun myötä. Raaka-aineiden valmistusprosesseissa syntyy myös huomattavat määrät jätettä ja sivukiveä. Kasvaviin materiaalityönsäin vastaaminen kestäväällä tavalla, korkeat ympäristö- ja muut kestävyysstandardit säilyttäen, on haastavaa. Nämä riskit voivat siirtyä ympäristökuormituksiksi maihin, joissa sääntely on heikkoa. Näihin haasteisiin vastaaminen edellyttää läpinäkyvyyttä lisäävien toimien kehittämistä, kuten tuotepasseja ja tiukempia kestävyysäännöksiä, joista monet ovat jo astuneet tai tulossa voimaan EU:ssa, mutta puuttuvat globaalisti. Lisäksi esimerkiksi akkuteknologioiden kehitystyön painopiste on yhä enemmän myös ympäristövaikutusten vähentämisessä, kuten energiankulutuksen pienentämisessä, haitallisten aineiden minimoinnissa ja vaihtoehtoisten materiaalien hyödyntämisessä.



6. Yhteenveto

Tässä raportissa arvioitiin puhtaan energiasiirtymän materiaalitarpeita Suomessa vuosina 2030–2040. Tarkastelu kattoi keskeiset energiateknologiat: aurinkosähkön, maa- ja merituulivoiman, sähköautojen akut, lämpöpumput ja elektrolyysit, sekä sähkön kantaverkon ja vetyninfrastruktuurin rakentamisen. Materiaalitarpeet laskettiin kolmen eri energiaskenaarion pohjalta ja niitä verrattiin nykyiseen kaivostuotantoon Suomessa ja EU:ssa. Kriittisten ja strategisten raaka-aineiden ohella tarkasteltiin tavanomaisia rakennusmateriaaleja, kuten terästä ja betonia. Lisäksi arvioitiin kiertotalouden mahdollisuuksia vähentää riippuvuutta primäärraaka-aineista.

Analyysin keskeisiä havaintoja ovat:

- Suurimmat materiaalivirrat syntyvät maatuulivoiman ja aurinkovoiman rakentamisesta.
- Merituulivoiman rakentamismäärä vaihtelee skenaarioiden välillä eniten, ja sillä on laajin vaikutus materiaalikysyntään, betonista ja teräksestä kestopaneelien harvinaisiin maametalleihin (Nd, Dy, Pr, Tb). Merituulivoiman lopullinen laajuus onkin koko materiaali-tarvearvion merkittävin yksittäinen epävarmuustekijä.
- Vedyn tuotantoon käytettävien elektrolyysierien materiaalitarpeet ovat määrällisesti tämän tarkastelun pienimmät, mutta kohdistuvat kriittisiin metalleihin.
- Sähköajoneuvojen akkujen nopean kehityksen vuoksi materiaaliarvot voivat muuttua tulevina vuosina. Uudet akkuteknologiat voivat lisätä joidenkin materiaalien (kuten litiumin) tarvetta, mutta toisaalta ne voivat mahdollistaa joidenkin kriittisten mineraalien korvaamisen. Esimerkiksi kiinteän olomuodon akut mahdollistaisivat huomattavasti pidemmän akun käyttöajan ja lataus syklien määrän, jolloin akkua ei välttämättä tarvitsisi uusia auton elinkaaren aikana.
- Kriittisistä materiaaleista alumiini, kupari, nikkeli, mangaani ja pii ovat kulutukseltaan tarkastelun merkittävimmät.
- Harvinaiset maametallit ovat pieniä massamäärinä, mutta kriittisiä toimitusketjujen näkökulmasta, joita Kiina dominoi.
- Absoluuttisesti suurin kysyntä kohdistuu teräkseen ja betoniin, joiden kulutus on kymmeniä tuhansia kilotonneja verrattuna kriittisten materiaalien satoihin, tai harvinaisten maametallien muutamiin kilotonneihin. Kriittiset materiaalit ovatkin pullonkaula saatavuuden, ei volyymin takia.
- Suomen oma kaivostuotanto kattaisi laskennallisesti koboltin, kromin, nikkelin, platinan ja sinkin vuosittaisen kysynnän tarkasteltujen energiateknologioiden osalta. Tulos on kuitenkin suhteutettava laajempaan kontekstiin: osassa näistä materiaaleista Suomen tuotanto muodostaa merkittävän osan koko EU:n kaivostuotannosta, jolloin kilpailu kysynnästä on eurooppalainen eikä pelkästään kansallinen kysymys. Lisäksi energiasiirtymän teknologiat edustavat vain yhtä osaa näiden materiaalien kokonaiskäytöstä, sillä monet muut teollisuudenalat kilpailevat samoista raaka-aineista.
- Riippuvuus erityisesti Kiinan metallien tuotannosta on hälyttävän korkealla tasolla. Geopolitiikan näkökulmasta öljyriippuvuuden rinnalle onkin tullut mineraaliriippuvuus, jonka voidaan arvioida kasvavan entisestään energiasiirtymän edetessä. Teknologioiden kehityksen avulla voidaan korvata kriittisiä metalleja vähemmän kriittisillä, mutta uusien teknologioiden kaupallistuminen voi viedä aikaa ja uusi teknologia voi olla teknisiltä ominaisuuksiltaan heikompi. Hyvinä esimerkkeinä ovat esimerkiksi akkuteknologioiden sekä aurinkopaneelien kehitykset.
- Metallien ja muiden materiaalien talteenottoa ja kierrätystä pitää kasvattaa nopeasti, jolloin voidaan jossain määrin vähentää neitseellisten raaka-aineiden käyttöä. Kierrätys-järjestelmien kehitys ei ole pysynyt energiateknologioiden käyttöönoton vauhdissa: suurin



osa asennetusta kapasiteetista ei ole vielä saavuttanut elinkaarensa loppua, joten primäärimateriaalien tarve jatkuu kierrätysmäärien kasvusta huolimatta.

- Pelkkä massapohjainen kierrätysaste voi johtaa harhaan: strategisesti tärkeät materiaalit voivat jäädä talteen ottamatta, vaikka kokonaiskierrätysprosentti näyttäisi hyvältä. Kriittisten materiaalien osalta tarvitaan materiaalikohtaisia talteenottotavoitteita.
- Kiertotalouden toteutuminen edellyttää teknisen kierrätettävyyden lisäksi toimivaa keräys–infrastruktuuria, tuotesuunnittelua purkamista silmällä pitäen sekä markkinoita laadukkaille sekundaarimateriaaleille.
- Keskeistä on tarkastella koko energiajärjestelmän kehitystä ja energian käytön maltillistamista. Irtautuminen fossiilisten polttoaineiden käytöstä on edellytys ilmaston–muutoksen hillinnälle. Koska se perustuu vahvasti sähköistymiselle, tulee sähkön kysyntä kasvamaan. Kiinnittämällä huomio energiankäytön tehostamiseen ja säästöön, voidaan suoraan vähentää myös kriittisten materiaalien kysyntää ja siten parantaa myös energia–turvallisuutta ja luonnon monimuotoisuutta sekä vähentää muita ympäristövaikutuksia.



Lähdeviitteet

- Alapieti, T.M. (2026). Review and comparison of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) methods used for abiotic resource consumption of electric vehicle batteries. Diplomityö, Oulun yliopisto, Vesi-, energia- ja ympäristötekniikka. <https://oulurepo.oulu.fi/handle/10024/62647>
- Buonomenna, M. G. (2023). Inorganic thin-film solar cells: challenges at the terawatt-scale. *Symmetry*, 15, 1718.
- Carrara, S., Baldassarre, B., Jakimow, M., Kuzev, T., MC Govern, L. ym. (2025). Deep dive on critical raw materials for wind turbines in the EU, BLACK, C. (editor), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/5665594>, JRC141759.
- Chen, B. et al. (2021). Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules. *Nature Communications*, 12, 5859.
- Ecoinvent, 2025. Ecoinvent 3.10 - The life cycle inventory database for sustainable production and consumption [database] [Verkkosivusto]. ecoinvent. Available from: <https://ecoinvent.org/> [1.9.2025].
- Efstratiadis, V. S., and Michailidis, N. (2022). Sustainable recovery and recycling of critical metals and rare earth elements from WEEE. *Metals*.
- Eikeng, E., Makhsoos, A., & Pollet, B. G. (2024). Critical and strategic raw materials for electrolyzers, fuel cells, metal hydrides and hydrogen separation technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 71, 433-464. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.096>
- ENTSO-E. (2024). TYNDP 2024 draft scenarios report (May 2024). <https://2024.entsos-tyndp-scenarios.eu>
- Euroopan Komissio (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023.
- Euroopan Komissio (2024a). European Critical Raw Materials Act. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en
- Euroopan Komissio (2024b). Rare earth elements, permanent magnets, and motors. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/rare-earth-elements-permanent-magnets-and-motors_en
- Fingrid (2025). Fingridin sähköjärjestelmävisio 2040, Skenaarioluonnosraportti maaliskuu 2025. <https://www.fingrid.fi/contentassets/c0abbd8691bc41ad9bcb99fcfc7dffe/sahkojarjestelmavisio---skenaarioluonnosraportti-maaliskuu-2025.pdf>
- Greenwald, J. E., Zhao, M., and Wicks, D. (2024). Critical mineral demands may limit scaling of green hydrogen production. *Frontiers in Geochemistry*.
- Hacklin, L. (2025). *Life cycle climate impacts of Finland's national hydrogen transmission network*.
- Hiltunen, P., Lindroos, T. J. & Rämä, M. (2026). Electrification of district heating: The impact of electricity price volatility and distribution temperatures on the optimal capacity mix, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 29, 2026, 101449, ISSN 2590-1745, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101449>.



- IEA, 2025. Global EV Outlook 2025. Paris. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-batteries> [23.9 2025].
- IEA PVPS (2025). Status of PV Module Recycling in IEA PVPS Task 12 Countries. Report IEA-PVPS T12-31:2025.
- IRENA and IEA-PVPS (2016). End-of-life management: solar photovoltaic panels. International Renewable Energy Agency and IEA PVPS.
- ISO 14040, 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040: 2006). International Organization for Standardization.
- ISO 14044, 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044: 2006).
- Kamran, M., Raugei, M., and Hutchinson, A. (2023). Critical elements for a successful energy transition: A systematic review. Renewable and Sustainable Energy Transition.
- Kiemel, S. et al. (2021). Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. International Journal of Energy Research, 45, 9914-9935.
- Kirppu, H. ym. (2026). Clean energy transition's impact on Finnish electricity system and district heating. [Artikkelia ei vielä julkaistu]
- Koljonen, T. (Ed.), Soimakallio, S. (Ed.), Silfver, T. (Ed.), Kivinen, M. (Ed.), Aakkula, J., Aittoniemi, E., Arola, T., Faehnle, M., Forsberg, T., Forsius, M., Haakana, M., Hirvelä, H., Honkatukia, J., Ikkala, L., Jarva, J., Karhinen, S., Karvonen, T., Karvosenoja, N., Kivimaa, P., Koreneff, G., Koskivaara, O., Lauhkonen, A., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Lounasheimo, J., Mikola, J., Mutanen, A., Myllykangas, J.-P., Myllyviita, T., Niemistö, J., Ojala, A., Paunu, V.-P., Rehunen, A., Savolahti, M., Savolainen, H., Similä, L., Sivonen, M., Sokka, L., Tirroniemi, J., Vainio, T., Viitanen, J., Vikfors, S., Vuori, K.-M. and Vähäkuopus, T. (2025a). Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) – keskipitkän aikavälin vaikutusarviot. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology No. 442. <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2025.T442>
- Koljonen, T., Silfver, T., Soimakallio, S., Kivinen, M., Aakkula, J., Haakana, M., Halonen, M., Halttu, K., Hirvelä, H., Kurki, S., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Markkanen, J., Mutanen, A., Niemistö, J., Similä, L., Sundqvist, H., Vainio, T., Viitanen, J. & Vikfors, S. (2025b). Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) – pitkän aikavälin ilmastosuunnitelman taustaselvitys. VTT Technology 443. VTT. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2025/T443.pdf>
- Li, C. et al. (2022). Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 164, 112603.
- Li, C., Dong, F., and Nian, V. (2025). Global photovoltaic waste under ratcheting climate ambition. Resources, Conservation and Recycling, 221, 108388.
- Mirletz, H. et al. (2023). Unfounded concerns about photovoltaic module toxicity and waste are slowing decarbonization. Nature Physics, 19, 1376-1378.
- Neumann, J. et al. (2022). Recycling of lithium-ion batteries: Current state of the art, circular economy, and next generation recycling. Advanced Energy Materials, 12.
- Nohl, L., Finck, R., Magnani, N. & Volkanovski, A. (2025). Material requirements for electricity grids, European Commission, Petten, 2025, JRC143190. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC143190>



- Paulsen, E. B., and Enevoldsen, P. (2021). A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades. *Energies*, 14, 4247.
- Pavel, C. C. et al. (2017). Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, 52, 349-357.
- Saarenaho, I., Kivimaa, P., Kaikkonen, H., Kivinen, M. & Turune, T. (2026). Evaluating perceptions of justice in critical raw materials provision in Finland: Perspective on dimensions and governance. *The Extractive Industries and Society*, Volume 27, 2026, 101920, ISSN 2214-790X, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2026.101920>.
- SimaPro, 2025. SimaPro Craft - LCA insights that drive positive change. SimaPro. Available from: <https://simapro.com/craft/> [24.11.2025]
- Soimakallo, S., Koljonen, T., Kivinen, M., Karhinen, S., Kivimaa, P., Lindroos, T. J., Sokka, L. ym. (2026). Siirtymä kestäväan energiajärjestelmään: Tiekartta ja synteesiraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja; 17/2026. ISSN 1796-1726. <http://hdl.handle.net/10138/632231>
- Tao, M. et al. (2020). Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28, 1077-1088.
- Taylor, N., Kuzov, T., Chatzipanagi, A., Carrara, S., Jakimow, M. ym., (2025). Deep dive on critical raw materials for solar photovoltaics in the EU, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/0883326>, JRC141760.
- Traficom, (2025). Ajoneuvokannan tilastot | Tieto Traficom Liikennekäytössä olevat ajoneuvot ajoneuvoluokittain ja käyttövoimittain 2007-2024 (xlsx). Saatavilla: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot> [3.9.2025]
- Tukes (2025). Rikasteiden, metallien, mineraalien ja vuolukiven tuotantoluvut (tonnia / v.) Saatavilla: <https://tukes.fi/documents/5470659/6373016/Metallien%20ja%20mineraalien%20tuotanto%20Suomessa%202015-2024.pdf/0b429819-5134-002c-01d9-43e17eaecb99/Metallien%20ja%20mineraalien%20tuotanto%20Suomessa%202015-2024.pdf?t=1746437843076>). [4.2.2026]
- USGS (2025). U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2025. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-silicon.pdf>
- Winjobi, O., Dai, Q. and Kelly, J. C., (2020). Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry addition for Lithium-ion Batteries in GREET 2020. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. Saatavilla: <https://share.google/DiIZNT6VoXExBRAs5>
- World Mining Data (2025). https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data__PDF-Files
- Zils, M.; Einarsson, S.; Hopkinson, P. (2024). *A UK foresight study of materials in decarbonisation technologies : the case of electrolyzers*. Nottingham, UK, British Geological Survey, 55pp. (CR/24/149N)



Liite 1: Materiaali-intensiteettitaulukot

Taulukko 1. Tuulivoiman materiaalitarpeiden laskemiseen käytetyt materiaali-intensiteetit.

Materiaali-intensiteetti [kg/MW]	2030 maa- tuulivoima	2040 maa- tuulivoima	2030 meri- tuulivoima	2040 meri- tuulivoima
Al	1306,5	1315	284	313
B	0,697	0,58	4,26	3,26
Cr	460	460	460	460
Cu	1620	1640	2900	3360
Dy	2,5	2,17	14,4	11
Fe	19000	19000	19000	19000
Mn	800	800	800	800
Mo	100	100	100	100
Nd	21,4	16,3	154	118
Ni	430	430	430	430
Pr	1,11	0,4	28,8	21,8
Tb	0,26	0,1	5,8	4,4
Zn	5450	5450	5450	5450
Y	0	0	0	0,06
betoni	400000	400000	400000	400000
lasi/hiilikomposiitti	7500	7500	7500	7500
polymeerit	4700	4700	4700	4700
teräs	110000	110000	110000	110000

Taulukko 2. Aurinkovoiman materiaalitarpeiden laskemiseen käytetyt materiaali-intensiteetit.

Materiaali-intensiteetti [kg/MW]	2030 aurinkovoima	2040 aurinkovoima
Ag	18,23	23,12
Al	11300	11260
Cu	5600	5600
In	0,472	1,645
Si	2380	2181,34436
lasi	46000	46000
teräs	68000	68000
betoni	60000	60000
muovi	8500	8500



Table 3. Elektrolyysereiden materiaalitarpeden laskemiseen käytetyt materiaali-intensiteetit.

Materiaali-intensiteetti [kg/MW]	2030 elektorlyyserit	2040 elektorlyyserit
Al	191,2	191,2
C (grafiiti)	5,4	5,4
Co	1,75	1,75
Cu	2,7	2,7
Ir	0,45	0,45
La	1	1
Ni	290	290
Pt	0,3	0,3
Sc	1,15	1,15
Ti	316,8	316,8
Y	0,25	0,25
Zr	37	37
teräs	3560	3560



Liite 2: Eri teknologioiden kiertotalousmahdollisuudet

Aurinkosähkö

Käyttöönoton kasvu ja kiertotalouden haasteet

Aurinkosähköpaneelit ovat pitkäikäisiä tuotteita, joten jätevirrat syntyvät viiveellä suhteessa asennusten kasvuun. IRENA ja IEA-PVPS arvioivat aikaisemmin kumulatiiviseksi PV-jätteeksi 1,7–8 miljoonaa tonnia vuoteen 2030 ja 60–78 miljoonaa tonnia vuoteen 2050 mennessä, mutta uudemmat arviot nostavat mahdollisen 2050 tason selvästi korkeammaksi riippuen ilmasto-tavoitteista, käyttöönotosta ja paneelien vikaantumisesta (IRENA and IEA-PVPS, 2016; Mirletz ym. 2023; Li ym. 2025; IEA PVPS, 2025). Keskeinen viesti ei siis ole, että PV-jäte olisi jo nyt suurta, vaan että keräys-, uudelleenkäyttö- ja korkealaatuiset kierrätysjärjestelmät on rakennettava ennen jätevolyyymien voimakasta kasvua.

Materiaaliprofiili ja kriittisyys

Kiteisen piin paneeleissa massa koostuu pääosin lasista ja alumiinikehyksestä, mutta strateginen arvo liittyy myös piihin, hopeaan, kupariin ja lyijyä sisältäviin juotteisiin. CdTe- ja CIGS-ohutkalvopaneeleissa kriittisyys liittyy telluuriin, indiumiin, galliumiin ja seleeniin, ja perovskiteissa huomiota vaativat erityisesti lyijy ja läpinäkyvät johteet kuten ITO (IRENA and IEA-PVPS, 2016; Tao ym. 2020; Buonomenna, 2023; Chen ym. 2021).

Nykyinen kierrätys ja talteenotto

Nykyinen kierrätys painottuu usein alumiinikehyksiin, ulkoisiin kuparijohtoihin ja lasiin, koska ne ovat massaltaan suuria ja helpommin erotettavia. Tämä voi tuottaa korkean massaperusteisen kierrätysasteen, vaikka hopea, pii ja ohutkalvojen kriittiset metallit menetettäisiin tai päätyisivät matala-arvoisiin virtoihin (Ardente ym. 2019; Tao ym. 2020; Isherwood, 2022; IEA PVPS, 2025).

Tekninen talteenottopotentiaali ja vaikeat fraktiot

Tekninen talteenottopotentiaali on nykykäytäntöä suurempi: delaminointi, mekaaninen erottelu sekä hydrometallurgiset ja muut kemialliset prosessit voivat palauttaa korkeita osuuksia lasista, alumiinista, piistä ja valituista metalleista. Raportoidut korkeat talteenottoluvut, kuten hopean yli 97–98 prosentin talteenotto tietyissä laboratorio- tai prosessikohtaisissa olosuhteissa, kuvaavat kuitenkin teknistä mahdollisuutta eivätkä markkinoiden keskimääräistä nykytilaa (Abdo ym. 2023; Kavousi and Alamdari, 2023).

Taloudelliset ja poliittiset ehdot sekä kiertotalouspotentiaali

Vaikeimpia fraktioita ovat EVA-enkapsulantti, polymeeritaustalevyt, fluoratut taustamateriaalit, ohutkalvojen mikrometrikrokset, pieninä pitoisuuksina olevat metallit sekä lyijyn ja kadmiumin hallinta. Vahva kiertotalous edellyttää siirtymää massaperusteisesta jätteenkäsittelystä arvoa säilyttävään talteenottoon, jossa keräys, jäljitettävyyden, uudelleenkäyttö, korjattavuus, turvallinen haitta-aineiden hallinta ja kriittisten materiaalien talteenotto tukevat toisiaan (Rubino ym. 2020; Ghahremani ym. 2024; Ndalloka ym. 2024).

Tuulivoima

Käyttöönoton kasvu ja kiertotalouden haasteet

Tuulivoiman kiertotalouskysymys eroaa aurinkosähköstä: turbiinit ovat jo nyt suurelta osin kierrätettäviä massan perusteella, koska teräs, kupari ja alumiini voidaan ohjata vakiintuneisiin romumarkkinoihin. Haaste ei siksi ole pelkkä jätteen käsittely, vaan harvinaisten maametalli-



magneettien, lapakomposiittien, sähkökomponenttien, perustusten ja uudelleenkäyttöpotentiaalin laadukas säilyttäminen (Topham ym. 2019; Paulsen and Enevoldsen, 2021; Demuytere ym. 2024).

Materiaaliprofiili ja kriittisyys

Tuulivoiman materiaaliprofiili jakautuu suurivolyymisiin ja kriittisiin materiaaleihin. Tornit, perustukset ja rakenteet koostuvat pääosin teräksestä ja betonista; generaattorit, kaapelit ja sähköjärjestelmät sisältävät kuparia ja alumiinia; lavat koostuvat lasi- ja hiilikuitukomposiiteista. Kriittisin 'hotspot' on NdFeB-kestomagneetti, joka sisältää neodyymia, praseodyymia, dysprosiumia ja terbiumia erityisesti suoravetoisissa ja merituulivoimasovelluksissa (offshore wind) (Pavel ym. 2017; Li ym. 2020; Li ym. 2022; Savvidou and Johnsson, 2023).

Nykyinen kierrätys ja talteenotto

Metallien kierrätys toimii nykyisin parhaiten, mutta massaperusteinen 85–90 prosentin kierrätettyvyys voi peittää vaikeimmat fraktiot: komposiittimateriaalit, upotetut kestomagneetit, pinnoitteet, liimat, elektronikan ja merituulivoiman perustukset (offshore foundations). Lapojen käsittelyssä käytetään mekaanista kierrätystä, sementtiunien rinnakkaisprosessointia, lämpökäsittelyä ja kemiallisia reittejä, mutta suljettu lapasta-lavaksi-kierto ei ole vielä vallitseva käytäntö (Jensen and Skelton, 2018; Beauson ym. 2022; Liu ym. 2022; Spini and Bettini, 2024).

Tekninen talteenottopotentiali ja vaikeat fraktiot

Tekninen potentiaali on korkea metalleissa, kehittyvä magneeteissa ja rajallisempi lavoissa. Merituulivoiman suljettu kierrätys voisi Li et al. (2022) mukaan kattaa enintään noin 3 prosenttia materiaalitarpeesta 2020–2030 ja 12 prosenttia 2030–2040, mikä osoittaa käyttöönoton ja käytöstäpoiston ajoituseron. Kestomagneeteille on olemassa uudelleenkäytön, magneetista magneetiksi -kierrätyksen (magnet-to-magnet recycling), vetyprosessoinnin sekä hydrometallurgisia ja pyrometallurgisia reittejä, mutta teollinen talteenotto on Euroopassa vielä varhaista (Yang ym. 2017; Rizos ym. 2024; Jäger ym. 2025).

Taloudelliset ja poliittiset ehdot sekä kiertotalouspotentiali

Vahva kiertotalous tuulivoimassa tarkoittaa käyttöiän pidentämistä, uudelleentehostamista, komponenttien uudelleenkäyttöä, laadukasta metallikierrätystä, magneettien suunniteltua irrotusta ja jäljitettävyyttä, lapojen korkeamman arvon hyödyntämistä sekä kierrätettäviä hartsi- ja termoplastisia lapamateriaaleja. Poliitiikan ja sääntelyn näkökulmasta keskeistä on varmistaa, että turbiinimallia ja magneettisisältöä koskeva tieto on saatavilla, purkumenettelyt ovat selkeitä, standardit ja sertifiointi tukevat kierrätettyjen materiaalien käyttöä ja massaperusteisia indikaattoreita täydennetään laadun, arvon ja kriittisyyden mittareilla (Kramer ym. 2024; Rizos ym. 2024; Martulli ym. 2025).

Sähköverkot ja verkkoinfrastruktura

Käyttöönoton kasvu ja kiertotalouden haasteet

Sähköverkot mahdollistavat uusiutuvan sähköjärjestelmän laajentumisen, mutta ne ovat myös merkittävä materiaalivirta. Kaapelit, muuntajat, sähköasemat, pylvää, johtimet ja tukirakenteet käyttävät erityisesti kuparia, alumiinia, terästä, rautaa, betonia, sementtiä, eristeitä ja komposiitteja (Chen ym. 2022; Kalt ym. 2022; Song ym. 2025).

Materiaaliprofiili ja kriittisyys

Sähköverkkojen materiaalikriittisyys on kaksitasoinen. Kupari ja alumiini ovat välttämättömiä johtavuuden vuoksi, ja teräs sekä betoni hallitsevat massaa ja sitoutuneita päästöjä. Samalla sähkö- ja elektroniikkakomponenteissa voi olla pieniä määriä hopeaa, kultaa, indiumia, galliumia, palladiumia ja harvinaisia maametalleja, joiden talteenotto on usein heikkoa, jos ne laimenevat monimateriaalisiin jätevirtoihin (Efstratiadis and Michailidis, 2022; Hagelüken and Goldmann, 2022).



Nykyinen kierrätys ja talteenotto

Nykyinen kierrätys on vahvinta puhtaissa metalliromuvirroissa. Kuparilla, alumiinilla ja teräksellä on toimivat markkinat, mutta suljettu korkealaatuinen kierto vaikeutuu, kun materiaalit ovat pinnoitteissa, kaapeleissa, eristeissä, komposiiteissa tai monimutkaisissa sähkökomponenteissa. Metallurgiset rajoitteet, kuten seosaineiden ja epäpuhtauksien kertyminen, voivat johtaa materiaalin käyttöön alempiarvoisissa sovelluksissa (downcycling); esimerkiksi kupari teräsromussa voi rajoittaa romun käyttöä korkealaatuissa terästuotteissa (Daehn ym. 2017; Reuter ym. 2019; Raabe, 2023).

Tekninen talteenottopotentiali ja vaikeat fraktiot

Tekninen talteenotto edellyttää parempaa erottelua, puhtaita virtoja ja kierrätysmyönteistä suunnittelua. Monikerrosrakenteet, ristosilloitetut polymeerit, pysyvät liimat, pinnoitteet ja upotetut rajapinnat voivat tehdä laadukkaasta materiaalien erottelusta kallista tai teknisesti vaikeaa. Kierrätysmyönteiset seokset, erotettavat liitokset sekä kierrätystä helpottavat dynaamiset polymeerirakenteet voisivat parantaa tulevaa suljettua kiertoa, mutta nämä ratkaisut on suunniteltava järjestelmään etukäteen (Dumée, 2021; Seier ym. 2023; Qin ym. 2022; Wan ym. 2023).

Taloudelliset ja poliittiset ehdot sekä kiertotalouspotentiali

Sähköverkkojen kiertotalouspotentiali on suuri, mutta se riippuu infrastruktuurin pitkästä käyttöiästä, purku- ja huoltosuunnittelusta, materiaalipasseista, romun laadunhallinnasta ja paikallisista kierrätysmarkkinoista. Pelkkä metalliromun keruu ei riitä, jos kriittiset, pienipitoiset tai monimateriaalisiin tuotteisiin sitoutuneet materiaalit menetetään käsittelyssä (Reuter ym. 2019; Lima ym. 2024; Munaro and Tavares, 2023).

Akut ja energiavarastot

Käyttöönoton kasvu ja kiertotalouden haasteet

Litiumioniakut hallitsevat sähköajoneuvoja ja kasvavaa paikallista sekä verkkomittaista varastointia. Materiaaliprofiili vaihtelee kemian mukaan: NMC- ja NCA-katodit sisältävät litiumia, nikkeliä, mangaania, kobolttia tai alumiinia, LFP-akut litiumia, rautaa ja fosfaattia; anodi on pääosin grafiittia, ja lisäksi käytetään kupari- ja alumiinikeräimiä, elektrolyyttejä, PVDF-sideaineita, separaattoreita ja kotelointia (Olivetti ym. 2017; Koech ym. 2024; Khalid ym. 2025).

Materiaaliprofiili ja kriittisyys

Kriittisyys liittyy erityisesti litiumiin, kobolttiin, nikkeliin, grafiittiin ja kupariin. Koboltti, nikkeli ja kupari ovat taloudellisesti houkuttelevimpia kierrätyskohteita, minkä vuoksi nykyiset pyro- ja hydro-metallurgiset reitit keskittyvät usein niihin sekä kasvavasti litiumiin. Optimoiduissa laitoksissa valittujen metallien talteenotto voi ylittää 90 prosenttia, mutta grafiitti, elektrolyytit, sideaineet, muovit ja osa litiumista voivat silti jäädä heikommin talteen (Mossali ym. 2020; Fan ym. 2020; Neumann ym. 2022; Li ym. 2023).

Nykyinen kierrätys ja talteenotto

Nykyinen kiertotalous ei vielä vastaa suljettua kiertoa. Globaalisti vain osa käytöstä poistuvista akuista päättyy viralliseen keräykseen ja kierrätykseen, ja logistiikkaa rajoittavat paloriski, kuljetussääntely, heikot palautus- ja keräysjärjestelmät (take-back systems) ja akkujen varastoituminen käyttäjille. Lisäksi kennokemioiden ja pakkausten monimuotoisuus vaikeuttaa automaattista purkua ja suoraa kierrätystä (Islam and Iyer-Raniga, 2022; Ramasubramanian ym. 2024; Ali ym. 2022; Rezaei ym. 2025).



Tekninen talteenottopotentialiaali ja vaikeat fraktiot

Tekninen talteenottopotentialiaali on kuitenkin merkittävä. Hydrometallurgia voi saavuttaa korkean metallitalteenoton, ja suora kierrätys voisi säilyttää katodimateriaalin rakenteen ja arvon, mutta se on vielä laajemmin laboratorio- tai pilot-vaiheessa ja herkkä syötevirtojen sekoittumiselle. Tulevissa skenaarioissa korkea keräysaste, tehokas talteenotto ja toisen eliniän sovellukset voivat kattaa huomattavan osan materiaalityrpeesta 2040–2050 mennessä, mutta nopeasti kasvava kysyntä ja tuotteiden käyttöikäviive tarkoittavat, että varhaiset vuosikymmenet nojaavat edelleen primääri-materiaaleihin (Baars ym. 2020; Maisel ym. 2023; Lopez ym. 2024; Kresse ym. 2025).

Taloudelliset ja poliittiset ehdot sekä kiertotalouspotentialiaali

Vahva akkukiertotalous edellyttää korkeaa keräysastetta, turvallista logistiikkaa, akkupasseja, standardoitua suunnittelua, kemioiden tunnistamista, kierrätyskapasiteetin rakentamista, toisen eliniän sovelluksia ja taloudellisia kannusteita myös vähäkobolttisille kemioille kuten LFP:lle. Natriumioni- ja muut vaihtoehtoiset akut voivat vähentää litium-, koboltti- tai nikkeli-riippuvuutta, mutta ne luovat omat materiaalityrrat ja kierrätystarpeet (Hirsh ym. 2020; Rostami ym. 2024; Tembo ym. 2024).

Elektrolyysit ja vihreä vety

Käyttöönoton kasvu ja kiertotalouden haasteet

Vesielektrolyysi käyttää useita teknologioita: alkalinen elektrolyysi (AEL/AWE), protoninvaihto-kalvoelektrolyysi (PEM), anioninvaihtokalvoelektrolyysi (AEM) ja kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC). Materiaalityrinnat määräytyvät elektrolyytin, lämpötilan, korroosionkeston, katalyyttien ja kustannusten perusteella (Miller ym. 2020; Anwar ym. 2021; Kumar and Lim, 2022).

Materiaalityrnni ja kriittisyys

Alkalinen teknologia käyttää tyypillisesti KOH-elektrolyyttiä, kalvoa tai diafragmaa sekä teräs- ja nikkeli-pohjaisia elektrodeja. PEM-teknologia käyttää protonia johtavaa polymeerikalvoa, kuten Nafionia, sekä happamassa ympäristössä toimivia platinaryhmän metalleja: platinaa vedyn-kehitykseen ja iridium- tai ruteniumoksideja hapenkehitykseen. AEM pyrkii yhdistämään alkalisen kemian ja kiinteän kalvon, jolloin voidaan käyttää ei-jalometallisia siirtymämetallikatalyyttejä. SOEC perustuu korkealämpötilaisiin keraamisiin elektrolyytteihin, kuten YSZ:ään, ja nikkeli- sekä oksidi-pohjaisiin elektrodeihin (Chand and Paladino, 2022; Iyer ym. 2022; Sezer ym. 2024; Mulk ym. 2024).

Nykyinen kierrätys ja talteenotto

Kriittisyys on teknologiasidonnaista. Alkalinen ja AEM-elektrolyysi ovat materiaalityrnnin kriittisyyden kannalta yleensä vähemmän herkkiä, vaikka nikkeli ja korkealaatuinen teräs ovat tärkeitä. PEM-elektrolyysin pullonkaula on iridiumin, platinan ja titaanin saatavuus; erityisesti iridium voi muodostaa rajoitteen, jos katalyyttikuormia ei vähennetä ja kierrätystä ei saada erittäin korkeaksi. SOEC käyttää suhteellisen runsaampia oksideja, mutta suuressa mittakaavassa myös zirkonia, yttria ja nikkeli ovat merkittäviä virtoja (Kiemel ym. 2021; Greenwald ym. 2024; Koj ym. 2024; Eikeng ym. 2024).

Tekninen talteenottopotentialiaali ja vaikeat fraktiot

Nykyinen elektrolyyserikierrätys on vasta kehittymässä, koska järjestelmät eivät ole vielä suurina määrinä elinkaarensa lopussa. Alkalisten järjestelmien kierrätettävyyden on vahvinta massan perusteella, koska teräs ja nikkeli voidaan palauttaa metallivirtoihin. PEM-järjestelmissä jalometallien talteenotto on taloudellisesti perusteltua, ja platinaa voidaan talteenottaa korkeilla osuuksilla, mutta fluoratut kalvot, ohuet MEA-rakenteet, kennopinojen eli stack-rakenteiden vaihtelu ja liitetyt materiaalityt vaikeuttavat kokonaisvaltaista kierrätystä. SOEC-kierrätyksessä haasteena ovat



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

TUTKIMUSRAPORTTI VTT-R-00337-26

39 (43)

metallien ja keraamien erottelu sekä joidenkin virtojen käyttö alempiarvoisissa sovelluksissa (downcycling) (Carmo ym. 2019; Kiemel ym. 2021; Staudacher ym. 2025; Kaiser ym. 2025).

Taloudelliset ja poliittiset ehdot sekä kiertotalouspotentiaali

Vahva kiertotalous edellyttää katalyyttikuormien pienentämistä, PGM-talteenottoa, kalvojen ja MEA-rakenteiden turvallista käsittelyä, standardoituja kennopinoja eli stack-rakenteita, kierrätykseen suunnittelua (design for recycling) ja teknologiapolkuja, jotka vähentävät harvinaisten jalometallien tarvetta. Kierrätys ei lyhyellä aikavälillä poista primäärimateriaalien tarvetta, koska kapasiteetti kasvaa nopeammin kuin elinkaaren loppuvaiheen virrat syntyvät (Minke ym. 2021; Clapp ym. 2023; Hoppe and Minke, 2025; Nti ym. 2026).



Liitteen 2 lähteet:

- Abdo, D. M., El-Shazly, A. N., and Medici, F. (2023). Recovery of valuable materials from end-of-life photovoltaic solar panels. *Materials*, 16, 2840.
- Ali, H., Khan, H., and Pecht, M. (2022). Preprocessing of spent lithium-ion batteries for recycling: Need, methods, and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Anwar, S., Khan, F., Zhang, Y., and Djire, A. (2021). Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 32284-32317.
- Ardente, F., Latunussa, C. E. L., and Blengini, G. A. (2019). Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. *Waste Management*, 91, 156-167.
- Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R., Melin, H., and Heidrich, O. (2020). Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature Sustainability*, 4, 71-79.
- Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D., and Jensen, P. D. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111847.
- Buonomenna, M. G. (2023). Inorganic thin-film solar cells: challenges at the terawatt-scale. *Symmetry*, 15, 1718.
- Carmo, M. et al. (2019). PEM water electrolysis: Innovative approaches towards catalyst separation, recovery and recycling. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Chand, K., and Paladino, O. (2022). Recent developments of membranes and electrocatalysts for hydrogen production by AEM water electrolyzers: A review. *Arabian Journal of Chemistry*.
- Chen, B. et al. (2021). Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules. *Nature Communications*, 12, 5859.
- Chen, Z., Kleijn, R., and Lin, H. (2022). Metal requirements for building electrical grid systems of global wind power and utility-scale solar photovoltaic until 2050. *Environmental Science & Technology*, 57, 1080-1091.
- Clapp, M., Zalitis, C., and Ryan, M. (2023). Perspectives on current and future iridium demand and iridium oxide catalysts for PEM water electrolysis. *Catalysis Today*.
- Daehn, K. E., Serrenho, C. A., and Allwood, J. M. (2017). How will copper contamination constrain future global steel recycling? *Environmental Science & Technology*, 51, 6599-6606.
- Demuytere, C. et al. (2024). Prospective material flow analysis of the end-of-life decommissioning: Case study of a North Sea offshore wind farm. *Resources, Conservation and Recycling*, 200, 107283.
- Dumée, L. (2021). Circular materials and circular design: Review on challenges towards sustainable manufacturing and recycling. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 9-23.
- Efstratiadis, V. S., and Michailidis, N. (2022). Sustainable recovery and recycling of critical metals and rare earth elements from WEEE. *Metals*.
- Eikeng, E., Makhsoos, A., and Pollet, B. (2024). Critical and strategic raw materials for electrolyzers, fuel cells, metal hydrides and hydrogen separation technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Fan, E. et al. (2020). Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: Challenges and future prospects. *Chemical Reviews*.
- Ghahremani, A. et al. (2024). Delamination techniques of waste solar panels: A review. *Clean Technologies*, 6, 280-298.
- Greenwald, J. E., Zhao, M., and Wicks, D. (2024). Critical mineral demands may limit scaling of green hydrogen production. *Frontiers in Geochemistry*.
- Hagelüken, C., and Goldmann, D. (2022). Recycling and circular economy: towards a closed loop for metals in emerging clean technologies. *Mineral Economics*, 35, 539-562.
- Hirsh, H. et al. (2020). Sodium-ion batteries paving the way for grid energy storage. *Advanced Energy Materials*, 10.
- IEA PVPS (2025). Status of PV Module Recycling in IEA PVPS Task 12 Countries. Report IEA-PVPS T12-31:2025.



- IRENA and IEA-PVPS (2016). End-of-life management: solar photovoltaic panels. International Renewable Energy Agency and IEA PVPS.
- Islam, M., and Iyer-Raniga, U. (2022). Lithium-ion battery recycling in the circular economy: A review. *Recycling*.
- Isherwood, P. J. M. (2022). Reshaping the module: the path to comprehensive photovoltaic panel recycling. *Sustainability*, 14, 1676.
- Iyer, R., Kelly, J., and Elgowainy, A. (2022). Electrolyzers for hydrogen production: Solid oxide, alkaline, and proton exchange membrane.
- Jäger, A., Miao, Z. C., and Weyand, S. (2025). Recovering rare-earth magnets from wind turbines: A potential analysis for Germany. *Energies*, 18, 2436.
- Jensen, J. P., and Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 165-176.
- Kaiser, C. et al. (2025). Recycling of solid oxide electrolyzer stacks. *Sustainable Materials and Technologies*.
- Kamran, M., Raugei, M., and Hutchinson, A. (2023). Critical elements for a successful energy transition: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Transition*.
- Kavousi, M., and Alamdari, E. K. (2023). A comprehensive and sustainable recycling process for different types of blended end-of-life solar panels. *Metals*, 13, 1677.
- Khalid, R., Shah, A., Javed, M., and Hussain, H. (2025). Progress and obstacles in electrode materials for lithium-ion batteries. *RSC Advances*, 15, 15951-15998.
- Kiemel, S. et al. (2021). Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. *International Journal of Energy Research*, 45, 9914-9935.
- Koj, J. C. et al. (2024). Green hydrogen production by PEM water electrolysis up to the year 2050. *Journal of Industrial Ecology*, 29, 145-158.
- Koech, A. et al. (2024). Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*.
- Kramer, K. et al. (2024). Quantifying circular economy pathways of decommissioned onshore wind turbines: The case of Denmark and Germany. *Sustainable Production and Consumption*, 49, 96-111.
- Kresse, C. et al. (2025). Global supply of secondary lithium from lithium-ion battery recycling. *Recycling*.
- Kumar, S. S., and Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*.
- Li, C. et al. (2022). Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112603.
- Li, C., Dong, F., and Nian, V. (2025). Global photovoltaic waste under ratcheting climate ambition. *Resources, Conservation and Recycling*, 221, 108388.
- Li, J. et al. (2020). Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions. *One Earth*, 3, 116-125.
- Li, P. et al. (2023). Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: A review. *Journal of Energy Chemistry*.
- Lima, A. et al. (2024). Mapping circular economy practices for steel, cement, glass, brick, insulation, and wood. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Liu, P., Meng, F., and Barlow, C. Y. (2022). Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106202.
- Lopez, F., Lauinger, D., Vuille, F., and Müller, D. (2024). On the potential of vehicle-to-grid and second-life batteries to provide energy and material security. *Nature Communications*, 15.
- Martulli, L. M. et al. (2025). Critical review of current wind turbine blades' design and materials and their influence on end-of-life management. *Engineering Structures*, 327, 119625.
- Maisel, F. et al. (2023). A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Miller, H. et al. (2020). Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: A review. *Sustainable Energy & Fuels*.



- Minke, C., Suermann, M., Bensmann, B., and Hanke-Rauschenbach, R. (2021). Is iridium demand a potential bottleneck in large-scale PEM water electrolysis? *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Mirletz, H. et al. (2023). Unfounded concerns about photovoltaic module toxicity and waste are slowing decarbonization. *Nature Physics*, 19, 1376-1378.
- Mossali, E. et al. (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of recycling treatments. *Journal of Environmental Management*, 264, 110500.
- Mulk, W. U. et al. (2024). Electrochemical hydrogen production through AEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Munaro, M., and Tavares, S. F. (2023). A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective. *Cleaner and Responsible Consumption*.
- Ndaloka, Z. N. et al. (2024). Solar photovoltaic recycling strategies. *Solar Energy*, 270, 112379.
- Neumann, J. et al. (2022). Recycling of lithium-ion batteries: Current state of the art, circular economy, and next generation recycling. *Advanced Energy Materials*, 12.
- Nti, R. Y. et al. (2026). Advancements in recycling techniques for hydrogen technologies with focus on electrolyzers. *Sustainable Materials and Technologies*.
- Olivetti, E., Ceder, G., Gaustad, G., and Fu, X. (2017). Lithium-ion battery supply chain considerations. *Joule*, 1, 229-243.
- Paulsen, E. B., and Enevoldsen, P. (2021). A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades. *Energies*, 14, 4247.
- Pavel, C. C. et al. (2017). Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, 52, 349-357.
- Qin, B. et al. (2022). Closed-loop chemical recycling of cross-linked polymeric materials based on reversible amidation chemistry. *Nature Communications*, 13.
- Raabe, D. (2023). The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical Reviews*, 123, 2436-2608.
- Ramasubramanian, B. et al. (2024). Ten major challenges for sustainable lithium-ion batteries. *Cell Reports Physical Science*.
- Reuter, M. et al. (2019). Challenges of the circular economy: A material, metallurgical, and product design perspective. *Annual Review of Materials Research*.
- Rezaei, M. et al. (2025). A review of lithium-ion battery recycling for enabling a circular economy. *Journal of Power Sources*.
- Rizos, V., Righetti, E., and Kassab, A. (2024). Understanding the barriers to recycling critical raw materials: The case of rare earth permanent magnets. *Energy Reports*, 12, 1673-1682.
- Rostami, H. et al. (2024). Advancements in cathode technology, recycling strategies, and market dynamics of sodium ion batteries. *Chemical Engineering Journal*.
- Rubino, A. et al. (2020). Development and techno-economic analysis of an advanced recycling process for photovoltaic panels. *Energies*, 13, 6690.
- Savvidou, G., and Johnsson, F. (2023). Material requirements, circularity potential and embodied emissions associated with wind energy. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 471-487.
- Seier, M. et al. (2023). Design from recycling: Overcoming barriers in reggranulate use in a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Sezer, N. et al. (2024). A comprehensive review of the state-of-the-art of proton exchange membrane water electrolysis. *Materials Science for Energy Technologies*.
- Song, C., Xu, C., and Sun, Y. (2025). Application of new power fittings coating material in power grid construction. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*.
- Spini, F., and Bettini, P. (2024). End-of-life wind turbine blades: Review on recycling strategies. *Composites Part B: Engineering*, 275, 111290.
- Staudacher, M. et al. (2025). Conceptual recycling chain for proton exchange membrane water electrolyzers. *Recycling*, 10, 121.



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

TUTKIMUSRAPORTTI VTT-R-00337-26

43 (43)

- Tao, M. et al. (2020). Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28, 1077-1088.
- Tembo, P., Dyer, C., and Subramanian, V. (2024). Lithium-ion battery recycling: A review of material supply and policy infrastructure. NPG Asia Materials, 16.
- Topham, E. et al. (2019). Recycling offshore wind farms at decommissioning stage. Energy Policy, 129, 698-709.
- Wan, B.-F. et al. (2023). Dynamic covalent adaptable polyimide hybrid dielectric films with superior recyclability. Advanced Materials, 36.
- Yang, Y. et al. (2017). REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: A critical review. Journal of Sustainable Metallurgy, 3, 122-149.