

Prizztech

NdFeB magneettien kierrätysdemonstraatio

Prizztech Oy

Minna Haavisto
11.3.2019

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	2
2.	Sintrattujen NdFeB-magneettien kierrättämispotentialiaali	2
2.1	Kierrätettävien magneettien määriä	2
2.2	Kierrättämistavat	9
2.3	Kustannukset.....	11
3.	Kierrätysdemonstraatio.....	13
3.1	Lähtötilanne.....	13
3.2	Kierrätettävien magneettien lähde	13
3.3	Magneettien irrotus roottorista	14
3.4	Magneettien prosessointi jauheeksi	15
3.5	Kierrätysmagneettien valmistus.....	15
3.6	Kierrätysmagneettien ominaisuudet.....	16
4.	Johtopäätökset.....	18
4.1	Demonstraation onnistuminen	18
4.2	Tulosten hyödynnettävyys laajemmin.....	18
4.3	Jatkotoimenpiteitä	19
5.	Lähteet.....	20

1. Johdanto

NdFeB-magneetit ovat avainkomponentteja modernissa sähköntuotannossa ja erilaisten sähkökoneiden moottoreissa. Sähköistyvä yhteiskunta lisää magneettien kysyntää voimakkaasti, minkä ennakoidaan johtavan raaka-aineiden saatavuusongelmaan. NdFeB-magneetit sisältävät raudan lisäksi noin kolmanneksen harvinaisia maametalleja, pääosin neodyymiä (Nd), mutta myös dysprosiumia (Dy) ja terbiumia (Tb). Dy ja Tb lisäyksiä käytetään erityisesti moottori ja generaattorisovelluksissa, sillä niillä saadaan parannettua magneettien korkean lämpötilan kestoa.

Suurin osa, yli 90 % näiden harvinaisten maametallien globaalista tuotannosta tapahtuu Kiinassa. Eurooppalainen magneetinvalmistus on siten varsin riippuvaista Kiinan kauppapolitiikasta. Kiina on pyrkinyt rajoittamaan raaka-aineiden vientiä asettamalla niille vientikiintiöitä ja pitämään siten jatkojalostuksen maan sisällä. Euroopassa on ryhdytty tähyämään uusia harvinaisten maametallien lähteitä raaka-aineiden saatavuuden turvaamiseksi paikalliselle magneettiteollisuudelle.

Maailmanlaajuisesti NdFeB-pohjaisia kestromagneetteja valmistetaan n. 70 000 tonnia vuodessa. Romuksi arvioidaan päätyvän vuosittain n. 54 000 tonnia magneetteja. Romutettavien magneettien saaminen kiertoon uusien magneettien raaka-aineeksi turvaisi sekä magneettituotannon raaka-aineiden saantia, että säästäisi energiaa ja pienentäisi magneettien valmistuksen ympäristövaikutuksia, kun neitseellisen raaka-aineen käyttöä voitaisiin vähentää.

Osana EU:n LifEP rahoitteista Circwaste-hanketta toteutettiin demonstraatio, jossa käytöstä poistetusta, suuri kokoisesta roottorista irrotettiin magneetit ja niistä valmistettiin jauhatuksen kautta kierrätysmagneetteja. Tällä demonstraatiolla oli tarkoitus osoittaa, että kierrättäminen on mahdollista ja jopa kannattavaa. Tässä raportissa kerrotaan demonstraation toteutuksesta ja tuloksista sekä arvioidaan magneettien kierrätyspotentiaalia.

2. Sintrattujen NdFeB-magneettien kierrättämispotentiali

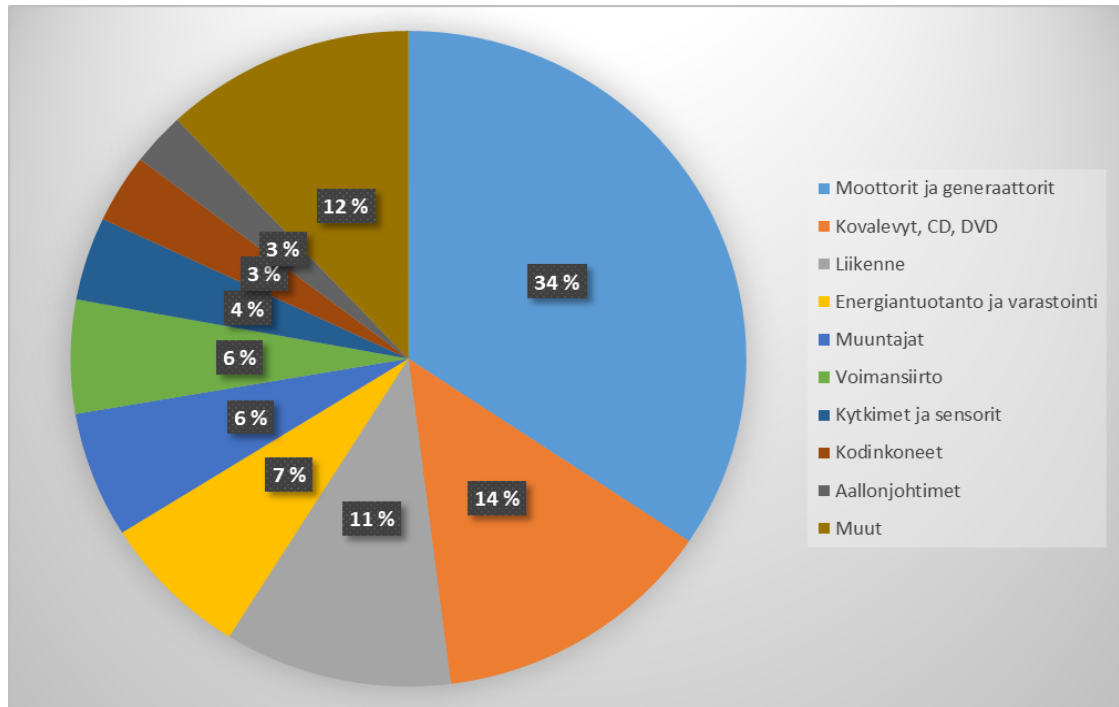
Kestomagneettinen NdFeB-yhdiste keksittiin vuonna 1984. Ensimmäinen vuosikymmen meni lähinnä ominaisuuksia tutkittaessa ja valmistusprosesseja hiottaessa. NdFeB magneetit alkoivat yleistyä moottori ja generaattorikäytössä 2000-luvun alkupuolella. KONE mullisti hissialan vuonna 1996 tuomalla markkinoille maailman ensimmäisen konehuoneettoman hissini.¹ ABB:n ensimmäiset kestromagneetikoneiden prototyypit valmistuivat Vaasassa vuonna 1998 ja Helsingissä vuotta myöhemmin. Kaupalliset toimitukset alkoivat potkurikäyttöillä ja tuuligeneraattoreilla vuonna 2001. Ensimmäinen paperikonetoimitus oli yli 30 kestromagneettimoottorin asentaminen M-Realin Äänekosken tehtaalte vuonna 2002.²

Moottoreiden käyttöikäksi suunnitellaan yleensä 20-30 vuotta. Toistaiseksi käytöstä poistuu vasta yksittäisiä kappaleita NdFeB magneetteja sisältäviä kestromagneettimoottoreita ja –generaattoreita joko rikkoutumisen tai modernisointitarpeiden vuoksi. Kierrättämispotentialin arvioidaan kasvavan huomattavasti seuraavan vuosikymmenen aikana.

2.1 Kierrätettävien magneettien määriä

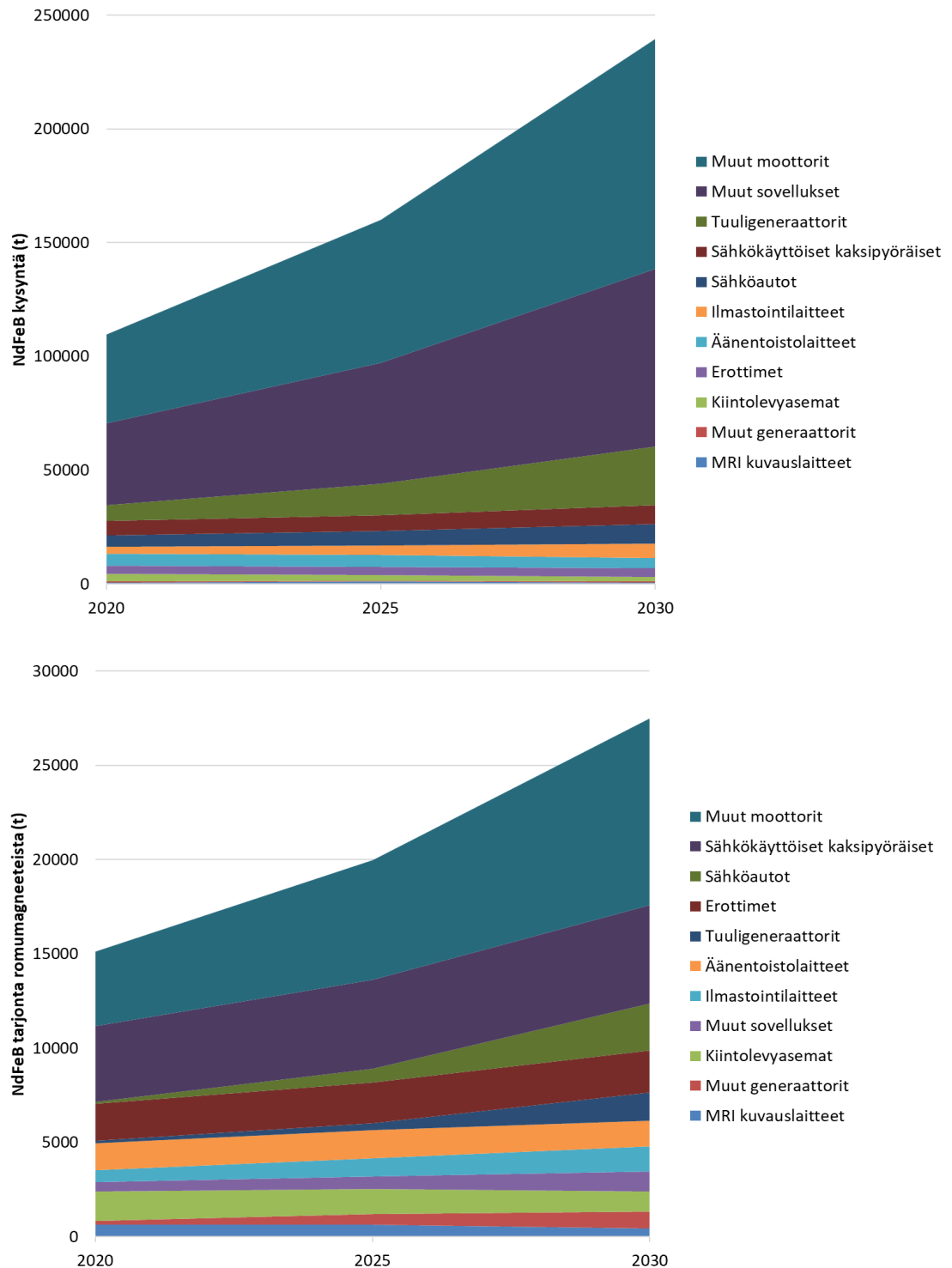
Globaali NdFeB-magneettituotanto jakaantuu eri käyttökohteisiin kuvan 1 osoittamalla tavalla. Reilu kolmannes magneeteista käytetään moottoreissa ja generaattoreissa. Moottori- ja generaattori-sovellukset ovat usein vaativia ja niissä magneettien suorituskvyyllä ja korkean lämpötilan kestävyvyydellä

on iso merkitys. Materiaaleissa käytetään usein myös kalliimpia raaka-aineita kuten Dy ja Tb. Potentiaalisena magneettien kierrätyslähteenä ne ovat varsin houkuttelevia.

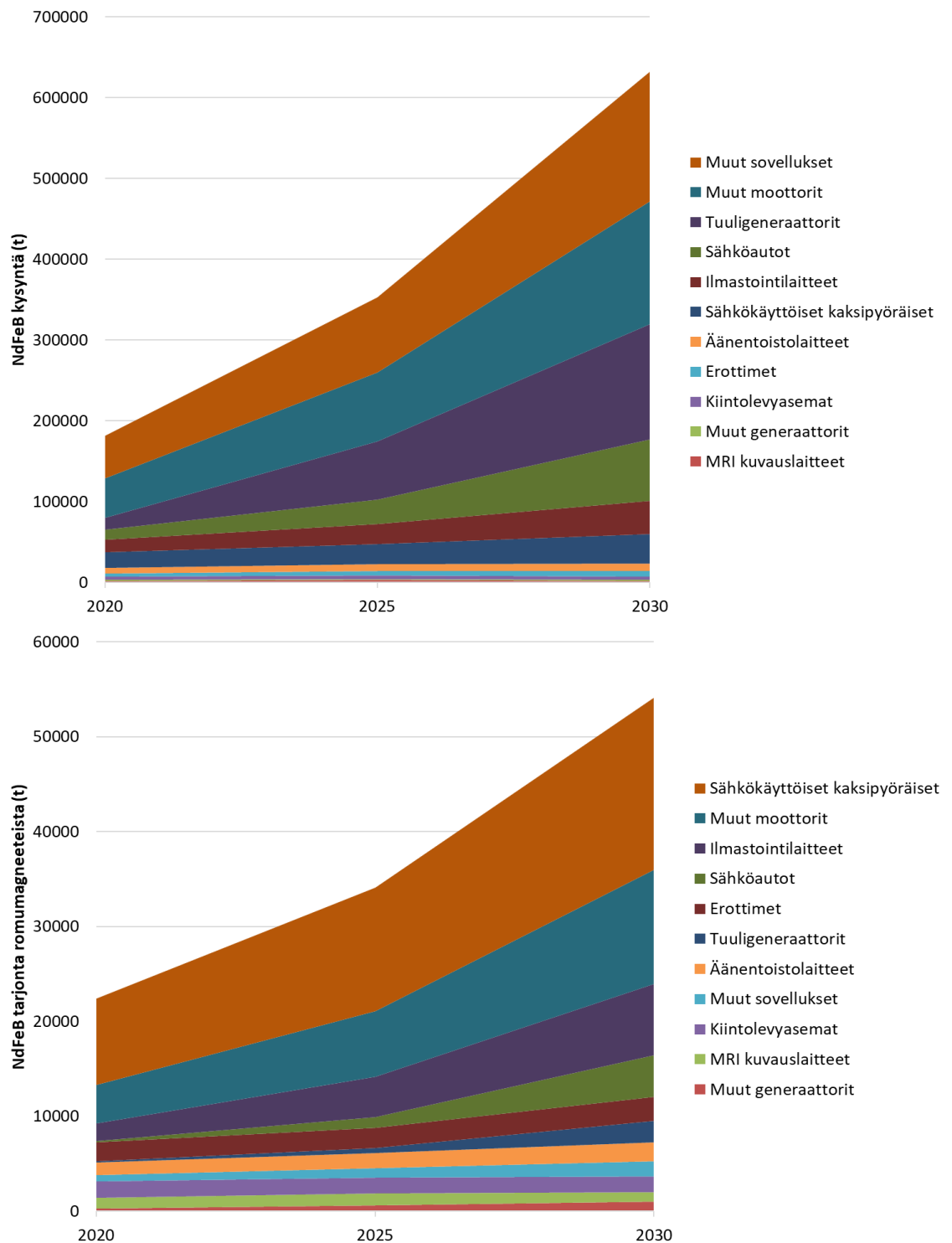


Kuva 1. NdFeB magneettien tuotannon jakaantuminen globaalisti eri sovelluksiin vuonna 2012. ³

Schultze ja Buchert ovat analysoineet globaalisti magneettien käyttökohteita ja mallintaneet erilaisia skenaarioita kysynnän kasvulle vuosina 2020, 2025 ja 2030.⁴ Skenaariot osoittavat, että n. 20 % magneetteihin tarvittavista harvinaisista maametalleista olisi saatavissa kierrätyskohteista.⁴ Näitä kierrätyskohteita ovat käyttökänsä päähän tulleet magneetit sekä magneettien valmistusprosessissa syntyvä romu tai hukkamateriaali. Suurimpina yksittäisinä sovelluskohteina, joista on odotettavissa tuhansia tonneja kierrätettäviä NdFeB-magneetteja jo vuonna 2020 ovat sähköiset kaksipyöräiset ja muut moottorit. Muita merkittäviä sovellusryhmiä magneettien kierrättämisen kannalta ovat tietokoneiden kovalevyt, kaiuttimet ja magneettierottimet. Sähköautot, tuuligeneraattorit ja ilmastointilaitteet alkavat tulla merkittäviksi kierrätysmagneettilähteiksi vasta lähempänä vuotta 2030.



Kuva 2. NdFeB kysyntä (yllä) ja netto tarjonta käytöstä poistetuista magneeteista (alla) matalan kysynnän skenaarioissa vuosina 2020-30 (tonnia NdFeB) (keräilyn ja irrottamisen aikana tapahtuvat häviöt huomioitu).⁴



Kuva 3. NdFeB kysyntä (yllä) ja netto tarjonta käytöstä poistetuista magneeteista (alla) korkean kysynnän skenaarioissa vuosina 2020-30 (tonnia NdFeB) (keräilyn ja irrottamisen aikana tapahtuvat häviöt huomioitu).⁴

The flowchart illustrates the NdFeB value chain in Finland, showing the flow of materials between various stages. The stages are represented by boxes, and the flows are indicated by arrows with numerical values. The chart is divided into two main sections by a dashed line labeled "EU:n raja" (EU border).

Stages and Flows:

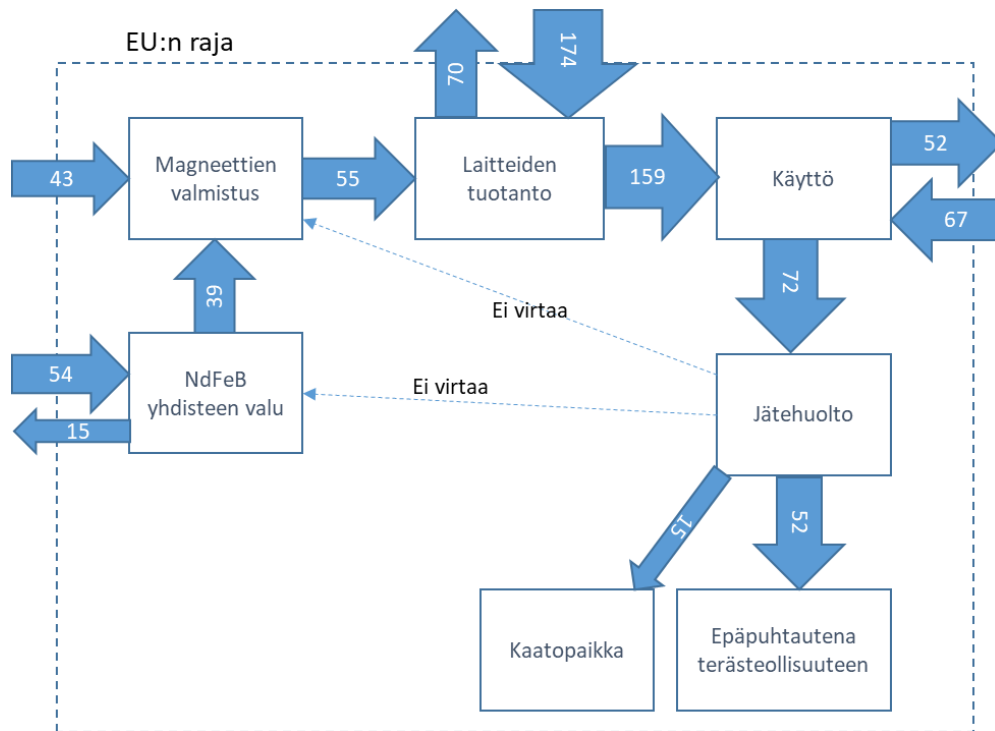
- Metallien erottelu (Metal Separation):**
 - Input: 220 (from EU)
 - Output: 198 (to EU)
 - Output: 18 (to NdFeB yhdisteen valu)
- NdFeB yhdisteen valu (NdFeB alloy casting):**
 - Input: 176 (from Magneettien valmistus)
 - Output: 217 (to EU)
 - Output: 59 (to EU)
- Magneettien valmistus (Magnet manufacturing):**
 - Input: 170 (from EU)
 - Output: 220 (to Laitteiden tuotanto)
- Laitteiden tuotanto (Device production):**
 - Input: 280 (from EU)
 - Output: 932 (to EU)
 - Output: 872 (to Käyttö)
- Käyttö (Use):**
 - Output: 369 (to EU)
 - Input: 354 (from EU)
 - Output: 575 (to Jätehuolto)
- Jätehuolto (Waste management):**
 - Output: 16 (to EU)
 - Output: 390 (to Epäpuhtautena terästeollisuuteen)
 - Output: 165 (to Kaatopaikka)

Other flows:

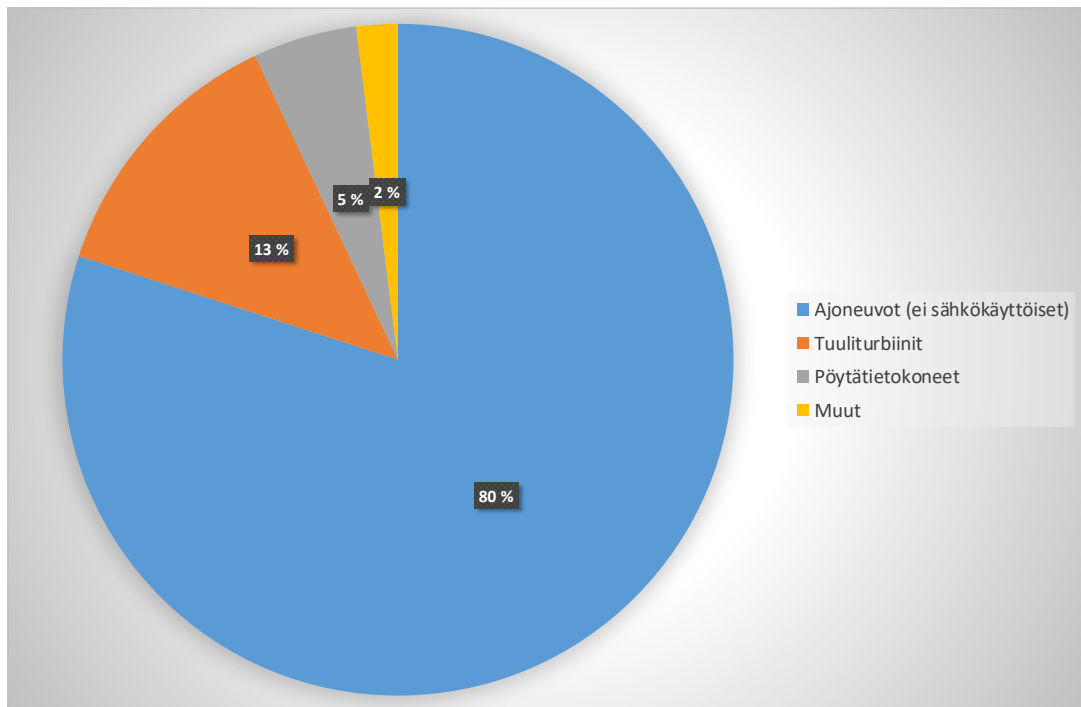
- From Jätehuolto to Metallien erottelu: Ei virtaa (No flow)
- From Jätehuolto to NdFeB yhdisteen valu: Ei virtaa (No flow)
- From Jätehuolto to Magneettien valmistus: Ei virtaa (No flow)

Kuvan 4 magneettivirrat voidaan jakaa käyttökohteisiin kuten kuvat 6 ja 7 havainnollistavat. Vuonna 2010 suurin osa Euroopan sisäisistä magneettivirroista (kuva 6) meni tavallisten autojen valmistukseen. Autot sisältävät suuren määrän pieniä moottoreita, jotka sisältävät magneetteja. Joskin osassa näistä käytetään muoviin sidottuja magneetteja, jotka eivät sovellu kierrätettäväksi pulverointimenetelmällä sintrattujen magneettien raaka-aineeksi. Toiseksi suurin magneettivirta menee tuuligeneraattoreihin. Niihin päätyi 13 % 872 tonnin Nd virrasta, mikä tarkoitti 113 tonnia neodyymia. Laitteiden sisältämien magneettien mukana Eurooppaan tuodusta neodyymistä 8 % tuli tuuligeneraattoreissa (kuva 7). Tämä tarkoittaa 28

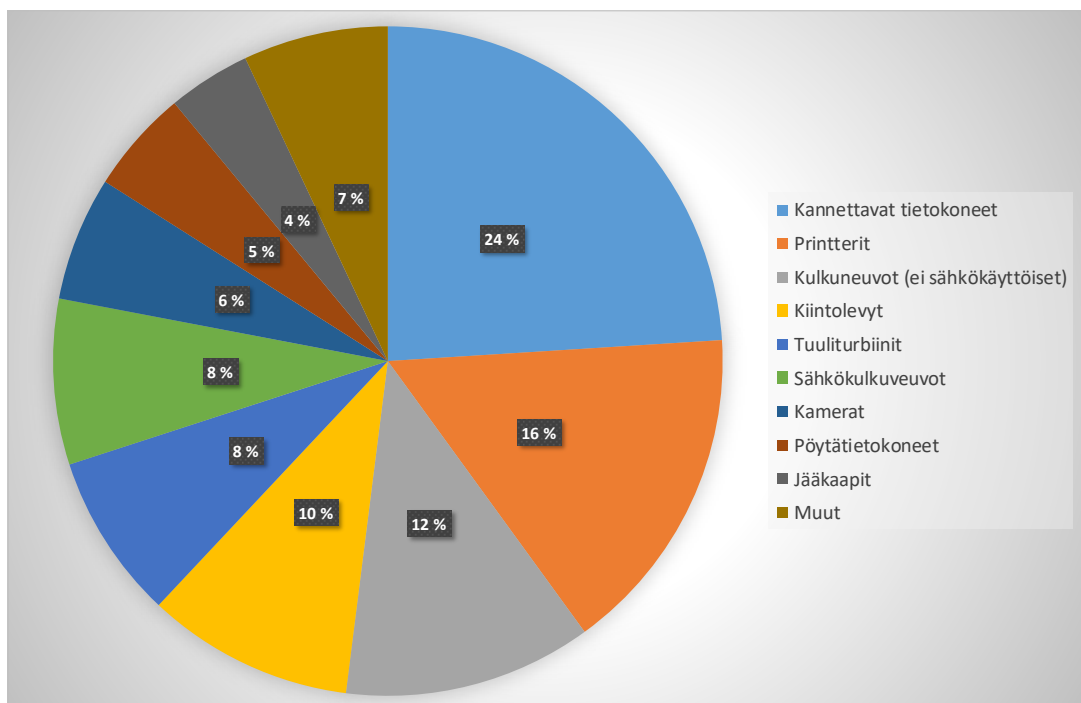
tonnia neodyymiä. Jätteenä (waste management) magneettien mukana päätynyt Nd virta on eritelty käyttökohteittain kuvassa 8. Vuonna 2010 se koostui lähinnä autoista ja kuluttajaelektroniikasta.



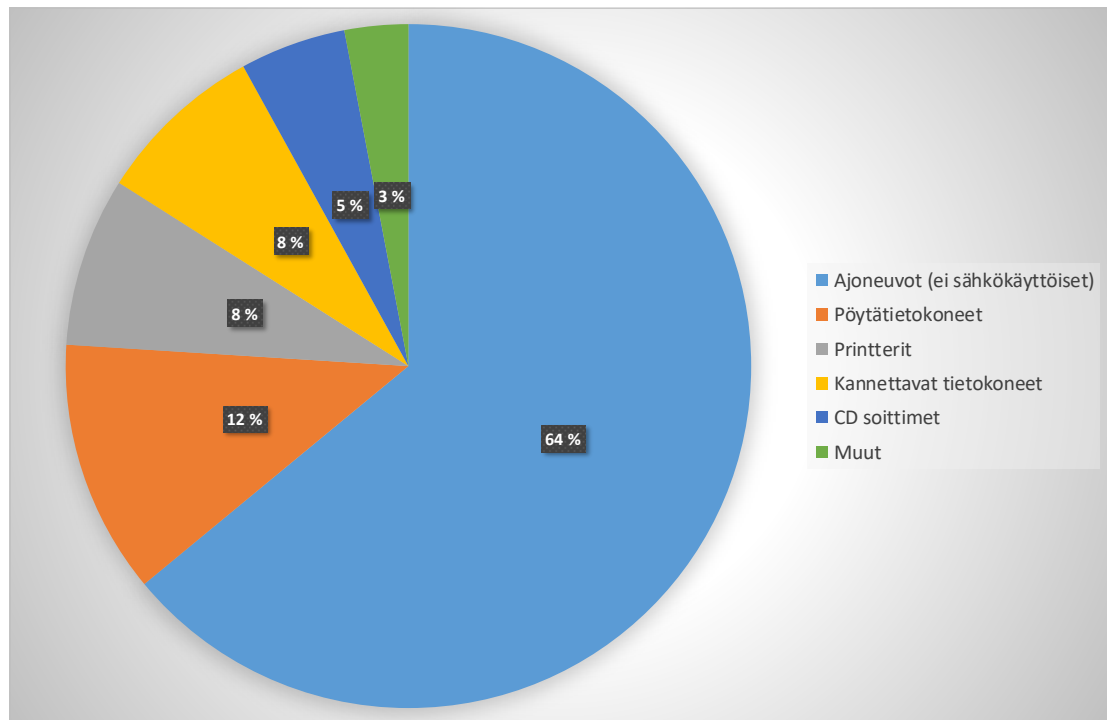
Kuva 5. Sankey diagrammi kestmagneettien sisältämän dysprosiumin (Dy) virroista EU:n alueella vuonna 2010. Luvut kuvaavat tonneja dysprosiumia.⁵



Kuva 6. Kestomagneettien sisältämän neodyymin (Nd) kuvassa 4 esitetty EU:n sisäisen virran (872 tonnia) jakaantuminen eri käyttökohteisiin.⁵



Kuva 7. Kuvassa 4 esitetyn maahantuotujen laitteiden mukana tulevien kestopagneettien sisältämän neodyymin (Nd) virta (354 tonnia) jaettuna käyttökohteittain.⁵



Kuva 8. Kuvan 4 kestopagneettien Nd virta jätteenksi (575 tonnia) käyttökohteittain.⁵

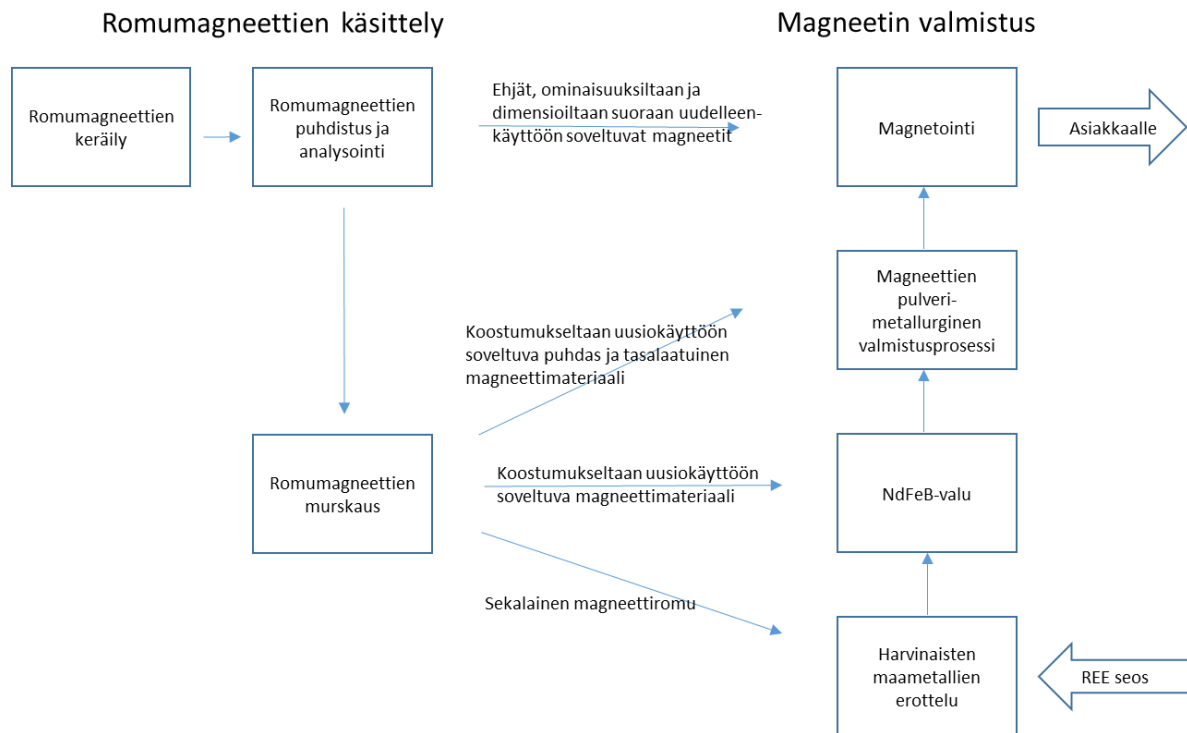
Suomi on ollut edelläkävijä NdFeB magneettien valmistamisessa ja magneettien hyödyntämisessä erilaisissa moottori ja generaattorisovelluksissa. Suomessa on lukuisia yrityksiä, joka käyttävät valmistamisessaan laitteissa NdFeB magneetteja. Esimerkiksi Kone Oy toimittaa globaalisti kestopagneettimoottorilla varustettuja hissejä n. 450 kpl päivässä (vuonna 2018). Hissimoottori sisältää kokoluokasta riippuen n. 4-8 kg magneetteja, joten yhteensä NdFeB magneetteja lähtee hissien mukana maailmalle yli 500 tonnia vuodessa.

2.2 Kierrättämistavat

Magneettien kierrättämiseen on olemassa monenlaisia tapoja, joskaan mikään niistä ei ole vielä käytössä tuotantomittakaavassa, vaan vasta tutkimusasteella.³ Tässä raportissa tarkastellaan ainoastaan sintrattujen NdFeB magneettien kierrättämistä.

Joissakin tapauksissa magneetteja voisi kierrättää vain uudelleenmagnetoimalla. Tämä edellyttäisi sitä, että magneetit ovat vaurioitumattomia ja lisäksi dimensioiltaan ja ominaisuuksiltaan suoraan sopivia uuteen käyttökohteeseen. Näin ei käytännössä kuitenkaan yleensä ole, joten magneetit joudutaan kierrättämään materiaalina. Magneetit on mahdollista hajottaa vetyhajotuksen kautta NdFeB – yhdistepartikkeleiksi ja käyttää nämä partikkelit uusien magneettien valmistuksessa. Tämä edellyttää sitä, että materiaali on puhdasta ja faasirakenteeltaan sopivaa uuteen käyttökohteeseen. Jos näin ei ole, joudutaan metalliseos valamaan uudelleen tai sitten materiaalista joudutaan erottelemaan sen sisältämät alkuaineet erilleen ja käytännössä aloittamaan magneettien valmistusprosessi aivan alusta. Kuvassa 9 on esitetty vaihtoehtoiset romumagneettien kierrätysreitit.

Tässä raportissa keskitytään reittiin, jossa kierrätettävä materiaali on koostumukseltaan uusiokäyttöön soveltuvaa puhdasta ja tasalaatuista ja siten se voidaan murskauksen jälkeen syöttää magneettien pulverimetallurgiseen valmistusprosessiin.

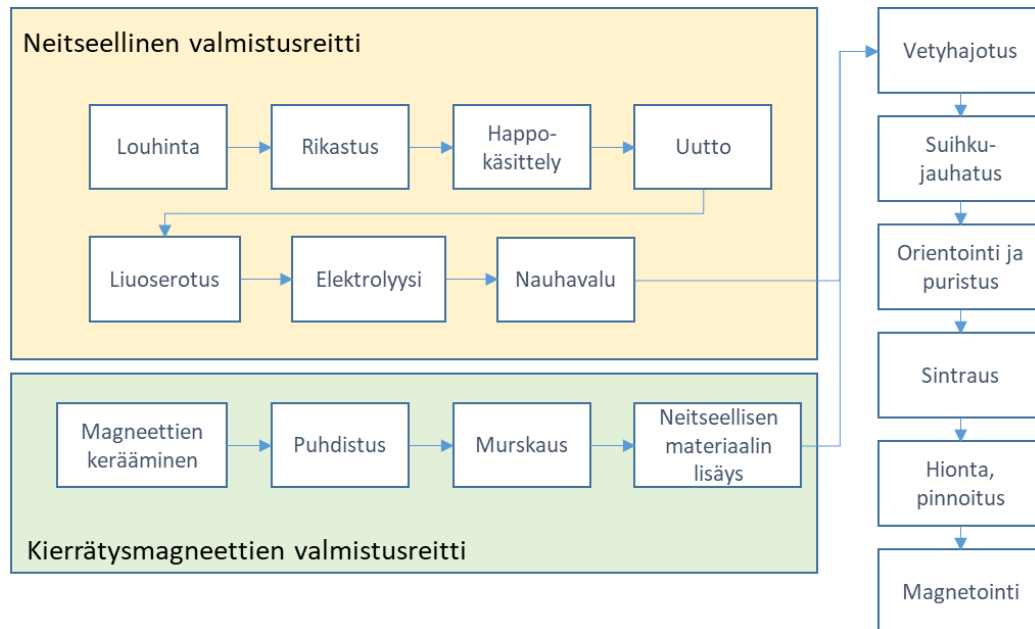


Kuva 9. Karkea esitys NdFeB magneettien kierrättämisvaihtoehdoista uusien magneettien raaka-aineeksi.

Urban Mining Company on kehittänyt menetelmän, jossa kierrätysmagneettijauheeseen lisätään pieni määrä tarkoin seostettua metalliseosta raerajamodifiointia varten. Tällä menetelmällä on valmistettu kierrätysmagneetteja, joiden kierrätysraaka-ainepitoisuus on ollut jopa 95 %. Raerajamodifioinnin ansiosta kierrätysmagneeteille on saatu huomattavasti parempi koersitiivivoima kuin alkuperäisillä romumagneeteilla.⁶ Tällä menetelmällä yhtiö on siis pystynyt jalostamaan heikon koersitiivivoiman lähtömateriaalista moottorisovelluksiin käyttökelpoisia magneetteja. Yhtiö on patentoinut kyseisen kierrätysmagneettien valmistusmenetelmän.

Niin sanottu magnet-to-magnet kierrättämistapa, jossa magneetit pulveroidaan uusien raaka-aineeksi, säästää huomattavasti energiaa verrattuna perinteiseen magneetin valmistukseen. Zakotnik et al. on laskenut, että pelkässä magneetinvalmistusprosessissa energiansäästö on 46 %, kun valuvaihetta ei tarvita. Jos verrataan romumagneettien keräämistä kaivostoimintaan säästää romunkeräämiseen perustuva materiaalinhankinta 95 % energiasta louhimiseen ja rikastamiseen verrattuna. Kaikkienensa romusta magneetiksi valmistusreitin on arvioitu säästävän 91 % energiasta kaivoksesta magneetiksi valmistusreittiin nähden.⁷ Jin et al. on verrannut näiden kahden valmistusreitin elinkaari vaikutuksia keskenään. Magnet-to-magnet kierrätysmenetelmällä magneettien valmistuksen ympäristövaikutukset saadaan putoamaan noin puoleen neitseellisen valmistuksen ympäristövaikutuksista.

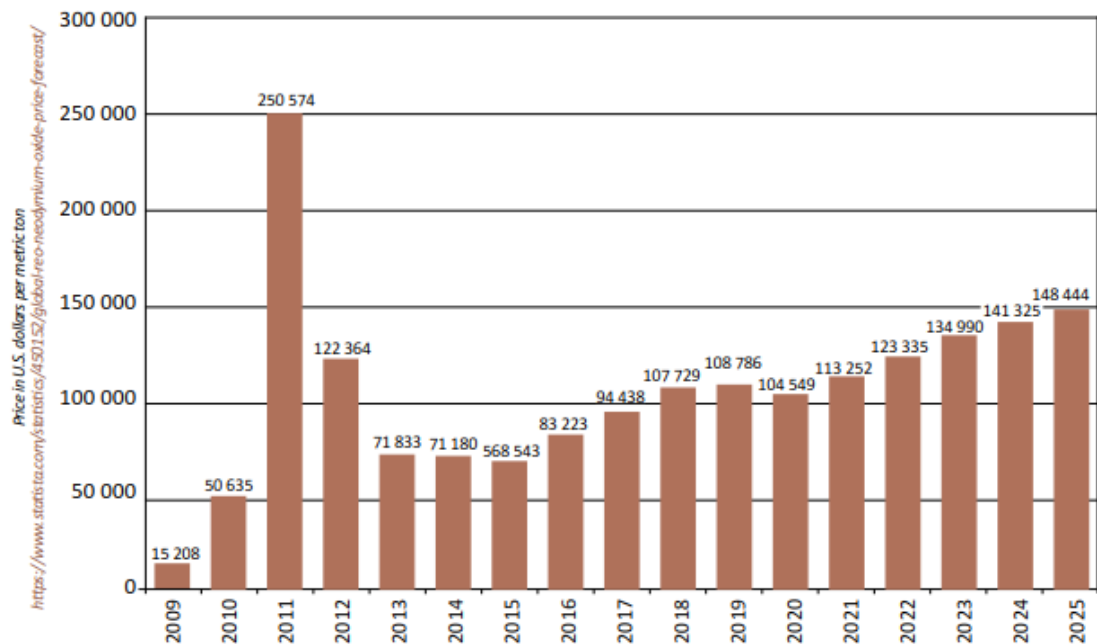
Kuvassa 10 on esitetty tässä demonstraatiossa toteutetun magneettien kierrätysprosessin vaiheet verrattuna neitseelliseen magneetinvalmistusprosessiin. Kierrätysprosessissa on paljon vähemmän energiaa ja kemikaaleja vaativia vaiheita. Pulveroinnin kautta tapahtuva kierrättämisprosessi on samantapainen kuin tuo Urban Mining Companyn magnet-to-magnet prosessi.



Kuva 10. Demonstraatiossa käytetty kierrätysmenetelmä verrattuna neitseellisen materiaalin valmistusreittiin.

2.3 Kustannukset

Jotta NdFeB magneettien kierrättäminen lähtee käyntiin, on sen oltava teknisesti toteutettavissa, mutta myös taloudellisesti kannattavaa. Harvinaisten maametallien jalostus on länsimaista loppunut kannattamattomana jo 2000-luvun alkupuolella, sillä Kiina on ryhtynyt tuottamaan näitä metalleja halvemmalla. Kiinassa esim. ympäristöhaittojen torjuntaan ei ole juurikaan panostettu. Vuonna 2010 Kiina kuitenkin päätti rajoittaa harvinaisten maametallien vientiä merkittävästi. Osin tämän vuoksi neodyymin hinta nousi muutamassa vuodessa jopa 16 kertaiseksi. Tämä käynnisti useita eri hankkeita, joissa selviteltiin mahdollisuuksia louhia ja jalostaa harvinaisia maametalreja Kiinan ulkopuolella. Myös magneettien kierrättämisestä alkoi tulla taloudellisesti houkutteleva vaihtoehto. Kuten kuvasta 11 nähdään, neodyymin hinta on tullut vuoden 2011 ennätystasolta selvästi alaspäin, mutta edelleen ollaan selvästi kriisiä edeltävän hintatason yläpuolella, eikä hinnan odoteta enää laskevan lähelle vuoden 2009 tasoa.



Kuva 11. Neodyymin hintakehitys ja arvio tulevasta kehityksestä. Neodyymin hinta 16 kertaistui vuosina 2009-2011.⁹

Magneettien kierrättämisessä kustannuksia tulee kierrättämisprosessin eri vaiheista sekä kierrätysraaka-aineeseen sekoitettavan neitseellisen materiaalin hankinnasta. Magneettien kierrättäminen vaatii seuraavat prosessivaiheet: romun keräys, magneettien erottelu/irrotus, demagnetointi, kuljetus, varastointi, puhdistus/pinnoitteen poisto, materiaalin analysointi ja murskaus. Murskattu rouhe vastaa magneetin valmistajan ostamaa raaka-ainetta, joka toimii uusien magneettien valmistusaineena. Jokainen prosessivaihe aiheuttaa kustannuksia.

Kierrätysmagneettirouheessa on enemmän epäpuhtauksia, kuten hiiltä, happea ja typpeä, kuin neitseellisessä raaka-aineessa. Nämä heikentävät valmistettavien kierrätysmagneettien ominaisuuksia. Kierrätysmagneettien on siis oltava hinnaltaan edullisempia, kuin neitseellisestä materiaalista valmistetut magneetit, jotta ominaisuuksien ero voidaan kompensoida hinnassa.

Taulukko 1. Magneettien kierrättämisestä aiheutuvat kustannukset arviolta 400 kg kierrätysmagneettierälle (erä koko vaikuttaa kustannuksiin oleellisesti).

Työvaihe	Arvioitu kustannus €/kg
Magneettien irrotus	0,8
Demagnetointi	1
Kuljetus/varastointi	0,2
Puhdistus/pinnoitteen poisto	1
Materiaalin analysointi	1
Murskaus	1
Yhteensä	5

3. Kierrätysdemonstraatio

3.1 Lähtötilanne

Magneettien kierrättämisdemonstraatioissa haluttiin tuottaa tietoa siitä, millaisiin ominaisuuksiin kierrätysraaka-aineesta pääosin valmistetuilla magneeteilla päästään, kun valmistus tapahtuu normaalin tuotantomittakaavan prosessilla. Demonstraation toteuttamiseksi etsittiin käytöstä poistettua isokokoista kestopagneettiroottoria, jossa olisi kierrätykseen soveltuvaa NdFeB-magneettimateriaalia vähintään 350 kg. Tähän tarkoitukseen kartoitettiin mm. käytöstä poistettuja tuuligeneraattoreita ja muita isoja magneettimoottoreita. Pienempien roottorien tapauksessa purettavaksi olisi tarvittu kymmeniä samanlaisia, jotta tasalaatuaista kierrätysraaka-ainetta olisi riittänyt koko demonstraation toteuttamiseksi. Pienempien roottoreiden purkaminen ja magneettien irrotus päätettiin jättää jatkohankkeelle.

3.2 Kierrätettävien magneettien lähde

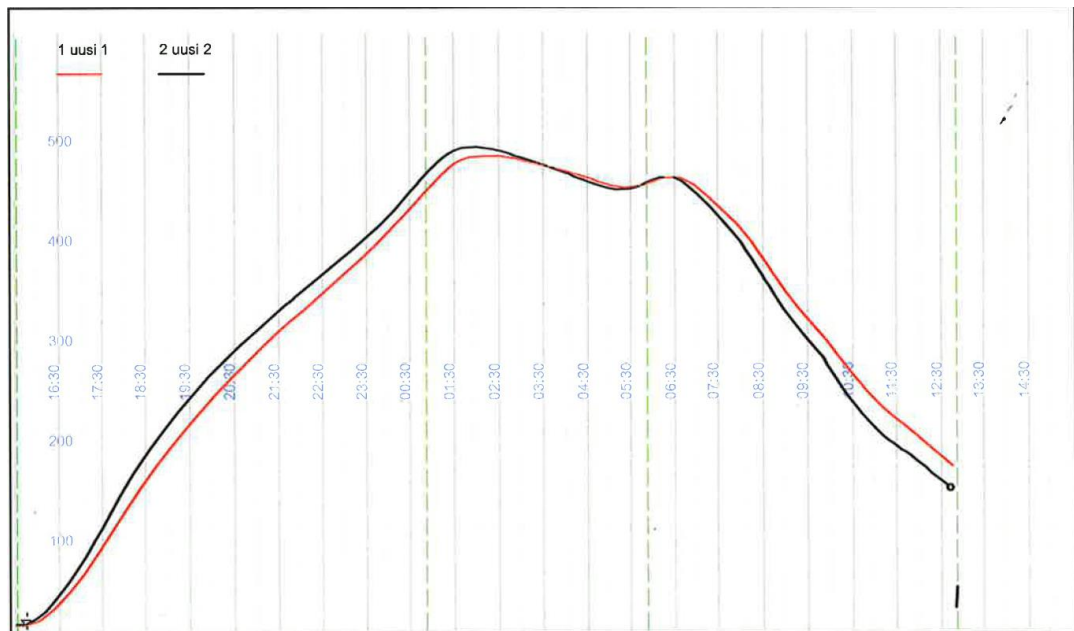
Kierrätettävien magneettien lähteeksi valikoitui kaksi magneettikuumentimen roottoria. Roottorit olivat joitakin kuukausia käytössä olleita prototyyppejä ja ne sisälsivät magneetteja yhteensä n. 400 kg. Roottorit olivat heti saatavilla, suhteellisen edullisia ja sisälsivät riittävän määrän magneettimateriaalia kierrätysdemoa varten. Roottorit olivat reilun metrin halkaisijaltaan ja niissä oli kymmenen magneettipötköä upotettuna alumiiniekikkoon. Jokaisessa pötkössä oli kuusi parin sentin vahvuista magneettia. Pohjalla oli yhtenäinen taustarauta. Magneetit olivat NiCuNi-pinnoitettuja ja kiinnitetty toisiinsa ja rakenteeseen Loctite liimalla.



Kuva 12. Romumagneettien lähteenä toiminut magneettikuumentimen roottori.

3.3 Magneettien irrotus roottorista

Magneettien irrottamiseksi roottorit lämpökäsiteltiin 450 °C lämpötilassa eli pidettiin 450°C teollisuusuunissa 5 tunnin ajan. Näin varmistettiin magneettien demagnetoituminen kauttaaltaan sekä liimojen palaminen pois. Lämpökäsittelyn jälkeen magneetit irrotettiin alumiinilevystä käsityönä. Toisesta roottorista magneetit nostettiin pois magneettinostimen avulla, toisesta roottorista nostettiin alumiinilevy pois magneettien ympäriltä. Kuvassa 13 on esitetty molemmat erottelutavat. Kun liimat olivat palaneet pois ja magneettiset voimat hävinneet demagnetoitumisen ansiosta, eivät magneetit olleet enää kiinni muussa rakenteessa.



Kuva 13. Lämpötilaprofiili magneettien demagnetointikäsittelyn aikana. Teollisuusuunin lämpötilaa nostettiin 100 °C tunnissa, kunnes 450°C lämpötila oli saavutettu. Lämpötilaa pidettiin n. 450°C:ssa viisi tuntia, jonka jälkeen uunin annettiin jäähtyä n. 150°C:een. Kokonaisuudessaan lämpökäsittely kesti vähän yli 21 tuntia.

Toinen roottorikiekko purettiin nostamalla magneetit alumiinilevystä magneettitarttujan avulla (kuva 14 vasen). Toinen roottori purettiin nostamalla alumiinikiekko magneettien ympäriltä hallinosturilla (kuva 14 oikea). Jälkimmäinen osoittautui nopeammaksi purkutavaksi.



Kuva 14. Magneettien irrottaminen roottorien alumiinikiekoista: magneettinostimen avulla (vas.) ja nostamalla hallinosturilla alumiinikiekko pois magneettien ympäriltä.

3.4 Magneettien prosessointi jauheeksi

Roottoreista irrotetut magneetit toimitettiin Neorem Magnets Oy:lle, joka poistatti romumagneettien nikkelpinnoitteen sinkopuhalluksella. Puhdistetuista magneeteista otettiin näytteet, joista analysoitiin materiaalin magneettiset ominaisuudet ja kemiallinen koostumus. Lopuksi magneetit murskattiin lekalla kuva 15 mukaiseksi rouheeksi.



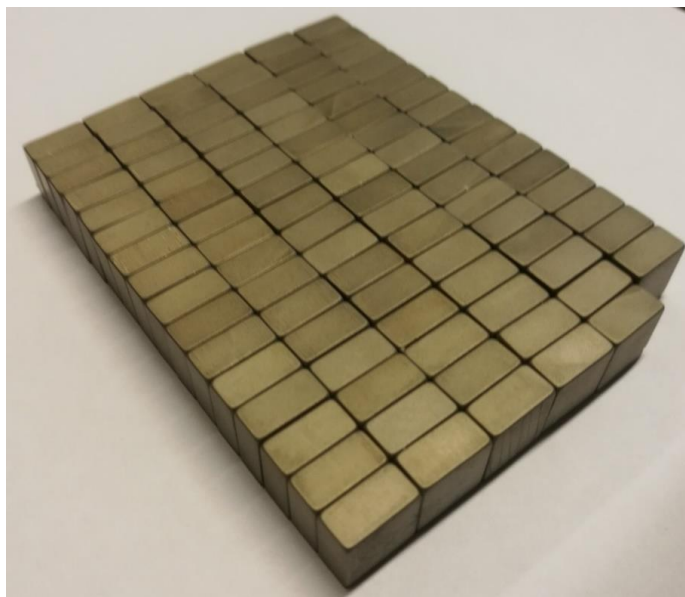
Kuva 15. Romumagneettimurskaa ämpärissä.

3.5 Kierrätysmagneettien valmistus

Kierrätysmagneettien valmistamista varten tilattiin sopivaa neitseellistä raaka-ainetta, jonka koostumus määriteltiin romumagneettimateriaalin kemiallisen analyysin perusteella. Lisättävän materiaalin oli

sisällettävä normaalia enemmän Nd-rikasta raerajafaasia, jotta kierrätysmagneettien sintraantuminen voitiin varmistaa. Kierrätysmagneetteja valmistettiin kolmenlaisia, kahdesta valmistetusta pulverierästä. Ensimmäisessä erässä kierrätysraaka-ainetta oli 50 %, toisessa 75 % ja kolmanteen sekoitettiin näitä jauheita keskenään, jolloin kierrätysraaka-aineen määräksi tuli n. 62 %. Kaikissa erissä käytettiin samaa neitseellistä raaka-ainetta.

Kierrätysmagneettien valmistukseen käytettiin normaalia Neorem Magnets Oy:n teollisuusmittakaavan pulverimetallurgista valmistusprosessia. Aluksi kierrätysraaka-aine ja neitseellinen raaka-aine laitettiin määrätellyssä suhteessa vetyhajotukseen, josta syntynyt jauhe hienonnettiin suihkujauhatuksella. Sopivaan partikkelikokoon jauhettu pulveri puristettiin samalla suunnaten rakeet magneettikentän avulla. Demossa kokeiltiin sekä aksiaalista että poikittaista orientointisuuntaa. Puristeet sintrattiin materiaalille sopivaksi arvioidulla sintrausohjelmalla. Valmiit magneetit magnetoitiin ja niiden magneettiset ominaisuudet mitattiin. Kuvassa 16 on magnetoituja kierrätysmagneetteja.



Kuva 16. Kierrätysraaka-aineesta valmistettuja näytemagneetteja.

3.6 Kierrätysmagneettien ominaisuudet

Kierrätysmagneeteille tehtiin kaikki testit, jotka uusille magneettituotantoerille teollisen valmistuksen yhteydessä tehdään. Kierrätysmagneeteista mitattiin magneettiset ominaisuudet ja testattiin korroosionkesto.

Magneettiset ominaisuudet

Magneettiset ominaisuudet mitattiin hysteresisgraafilla huoneenlämpötilassa (n. 22 °C), 60 °C:ssa ja 100 °C:ssa muutamasta näytteestä. Käyristä määritettiin remanenssi ja koersitiivivoima. Remanenssi määritettiin myös Helmholtz-mittauksen avulla useammalle näytteelle jokaisesta erästä, jolloin saatiin paremmin esiin kunkin erän sisäinen variaatio. Tämä on erityisen tärkeää, jos myöhemmin kierrätysmagneettien valmistusprosessia halutaan optimoida.

Taulukko 2. Alkuperäisen romumagneetin ja siitä valmistetun kierrätysmagneetin remanenssin (B_r) ja koersitiivivoiman (H_c) arvoja eri lämpötiloissa poimittuna yksittäisten näytteiden demagnetointikäyrästä.

Lämpötila	20°C		60°C		100°C	
Ominaisuus	B_r [T]	H_c [kA/m]	B_r [T]	H_c [kA/m]	B_r [T]	H_c [kA/m]
Alkuperäinen	1,37	1451	1,32	1029	1,25	678
50 % kierrätysraaka-ainetta	1,32	1427	1,27	1005	1,2	667
62 % kierrätysraaka-ainetta	1,33	1436	1,28	1005	1,21	670
75 % kierrätysraaka-ainetta	1,34	1427	1,28	1008	1,22	670

Parhailla demonstraatioissa valmistetuilla kierrätysmagneeteilla päästiin remanenssissa lähelle alkuperäisen magneetin arvoja. Ennen demonstraatiota laskettiin saavutettavien ominaisuuksien maksimitasot koostumustietojen perusteella. Parhaiden kierrätysmagneettien ominaisuuksissa päästiin hyvin lähelle näitä teoreettisesti saavutettavissa olevia tasoja. Korkein remanenssi saavutettiin 75 % kierrätysraaka-ainetta sisältävillä magneeteilla, sillä kyseisissä magneeteissa magneettisen faasin osuus oli suurin ja vastaavasti ei-magneettisen raeraja-faasin osuus pienin. Parhailla kierrätysnäytteillä päästiin 98 %:iin alkuperäisen magneetin magneettisesta voimasta.

Korroosionkesto

Kierrätysmagneettien korroosioikäytymistä testattiin HAST-testillä. Magneettien raerajafaasin määrällä ja laadulla on suora vaikutus korroosioherkkyyteen. Kierrätysmagneeteissa raerajafaasi poikkeaa hieman normaalimagneeteista. Taulukossa 3 on esitetty korroosion aiheuttama keskimääräinen häviö testatuille magneeteille kierrätysmateriaalipitoisuuden mukaan. Samasta taulukosta nähdään myös rearajafaasin laskennallinen määrä kierrätysmagneeteissa. 50 % kierrätysraaka-ainetta sisältävissä magneeteissa tapahtui selvää korroosiota, kun taas muissa laaduissa korroosio on selvästi vähäisempää. Vähiten korroosiota tapahtui 75 % kierrätysraaka-ainetta sisältävissä magneeteissa. Korroosioherkkyyden kasvu raerajafaasin kasvun myötä on selvästi havaittavissa. Korroosionkeston kannalta raerajafaasin määrä tulisi pitää kierrätysmagneeteissa, kuten perinteisesti valmistetuissa magneeteissakin, mahdollisimman pienenä.

Taulukko 3. Korroosiohäviö ja raerajafaasin määrä magneetissa.

	Häviö	raerajafaasin määrä
Alkuperäinen	0,892	
50 %	71,181	5,1
62 %	1,644	4,4
75 %	0,238	3,7

4. Johtopäätökset

4.1 Demonstraation onnistuminen

Demonstraatioon tehtävänä oli osoittaa, että vanhasta, käytöstä poistetusta kestopagneettiroottorista magneetit voidaan irrottaa, puhdistaa ja murskata uusien magneettien raaka-aineeksi. Tältä osin demonstraatio onnistui hyvin. Magneetit saatiin demagnetoitua lämpökäsittelyllä ja irrotettua roottorista melko helposti. Magneettien puhdistuksessa ja nikkelipinnoitteen poistossa onnistuttiin myös, eikä kierrätysraaka-ainemurskaan päätynyt ominaisuuksia heikentäviä epäpuhtauksia. Magneettien pulverimetallurginen valmistusprosessi on varsin haastava ja uudentyyppisen kierrätysmateriaalin käsittely vaatii sopivien prosessiparametrien hakemista. Parhailla demossa valmistetuilla kierrätysmagneeteilla päästiin kuitenkin lähes alkuperäisten magneettien ominaisuuksien tasolle. Demonstraatio onnistui siis osoittamaan kierrätyksen potentiaalisesti mahdollisuudeksi sintrattujen NdFeB magneettien valmistuksessa.

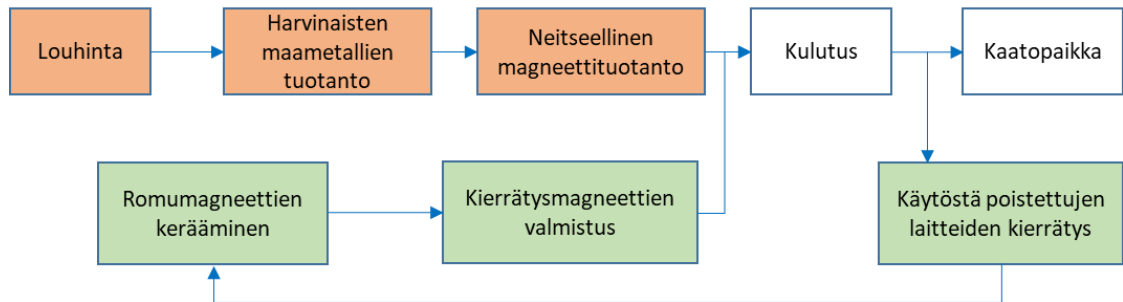
Tiedossa oli, että ominaisuuksissa ei aivan päästä alkuperäisen magneetin tasolle, mutta laskenta osoitti, että muutaman prosentin päähän alkuperäisestä remanenssista on mahdollista päästä. Näin pieni häviö voidaan vielä kompensoida sovellussuunnittelussa, mikäli magneeteille saavutettavat ominaisuudet ovat etukäteen tiedossa. Tämä edellyttää sitä, että kierrätysraaka-aineesta valmistettujen magneettien ominaisuuksia on voitava tarkoin arvioida ja laskea jo valmistusprosessin alkuvaiheessa. Tämä taas vaatii valmistusprosessin hyvää hallintaa kaikissa vaiheissa. Demonstraatio toi arvokasta tietoa mm. kierrätysraaka-aineen käyttäytymisestä prosessin eri vaiheissa.

Sekä magneettisten ominaisuuksien mittauksissa että korroosiokokeissa parhaat tulokset saavutettiin 75 % kierrätysraaka-ainetta sisältävillä magneeteilla, koska näissä raerajafaasia oli vähiten suhteessa magneetin kokonaismassaan. Näissä magneeteissa saattoi olla optimaalinen määrä raerajafaasia: riittävästi, jotta magneetit sintraantuivat, mutta riittävän vähän, jotta magneettiset ominaisuudet ja korroosionkesto eivät heikkenet liikaa. Raerajafaasin määrän tarkempaa optimointia varten demo antoi erittäin hyvän tuntuman.

Kierrätysmagneettien valmistusprosessi vaatii vielä lisää testausta ja optimointia. Kaikki demossa valmistetut näytteet eivät sintraantuneet optimaalisesti, mikä näkyi vajaana tiheytenä ja heikompina magneettisina ominaisuuksina. Optimaalisen sintrausohjelman löytäminen kullekin kierrätysmagneettierälle vaatii vielä jatkotestausta.

4.2 Tulosten hyödynnettävyys laajemmin

Demonstraatioon tarkoitus oli osoittaa, että sintrattujen NdFeB magneettien kierrättäminen pulverointiprosessin kautta uusien magneettien raaka-aineeksi on mahdollista ja varteenotettava vaihtoehto tulevaisuudessa. Prosessi on toimiessaan varsin energia- ja kustannustehokas menetelmä. Tämän kierrätysmenetelmän käyttökelpoisuus ja potentiaali pystyttiin osoittamaan. Kuvassa 17 on esitetty perinteisen magneettivalmistusprosessin rinnalla (oranssi) kierrätysmagneettien valmistusprosessi (vihreä). Tässä demonstraatioissa osoitettiin, että kierrätysmagneettien teollisen mittakaavan valmistusprosessi toimii. Tämän jälkeen voidaan keskittyä kahteen muuhun vihreään laatikkoon eli romumagneettien keräilyinfraan ja -järjestelmiin.



Kuva 17. Neitseellisten magneettien valmistusprosessi (oranssi) verrattuna pulveroinnin kautta tapahtuvaan kierrätysprosessiin.⁸

Tämän demonstraation tulos toivottavasti herättää mielenkiintoa kierrätysliiketoimintaa harjoittavissa yrityksissä.

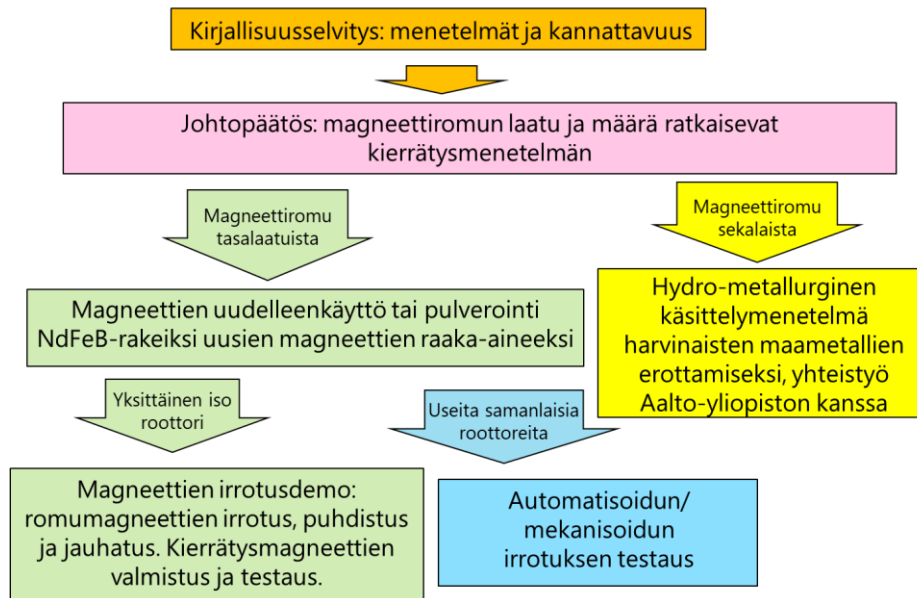
4.3 Jatkotoimenpiteitä

Tämä Circwaste-hankkeessa toteutettu magneettien irrotus- ja kierrätysmagneettien valmistusdemonstraatio on osa isompaa kokonaisuutta, jossa erilaisilla hanketoimilla pyritään luomaan otolliset olosuhteet sintrattujen NdFeB magneettien kierrättämisliiketoiminnan käynnistymiselle. Kuvassa 18 on hahmotettu tätä kokonaisuutta. Pohjatyönä Prizztech Oy:ssä tehtiin kirjallisuusselvitys, jossa perehdyttiin kierrättämistapavaihtoehtoihin ja kierrätyksen kannattavuuteen. Selvityksen johtopäätösten perusteella tämä kierrätysdemonstraatio päätettiin kohdistaa yhteen suureen kestromagneettiroottoriin ja demonstroida kuvan 18 vihreällä merkitty polku. Rinnalla on käynnissä kaksi muutakin hanketta, toinen Aalto-yliopiston taholla ja toinen Prizztech Oy:ssä. Aalto-yliopistossa tutkitaan sekalaisen magneettieromun hydrometallurgista kierrättämisprosessia ja Prizztech Oy:ssä mahdollisia tapoja irrottaa NdFeB magneetteja keskikokoisista moottoreista sarjatyönä.

Circwaste-demon kuluessa on suunniteltu myös jatkotoimenpiteitä, joita on tarkoitus toteuttaa vuoden 2019 aikana alkavassa Kriittisten kierrätysmetallien koetehdas-konsepti-hankkeessa. Hankkeessa toteutetaan mm. tuuligeneraattorin purku ja magneettien irrotus. Tuuligeneraattoreissa on magneetteja useita satoja, jollei jopa tuhansia kiloja per generaattori. Niiden käsittely ei ole helppoa, sillä magneettiset voimat ovat valtavia. Purkutyössä työturvallisuus on otettava huomioon jokaisessa työvaiheessa. Tavoitteena on luoda ohjeistusta niin moottoreiden ja generaattoreiden purkamista suunnitteleville kierrätysalan yrityksille kuin näiden laitteiden valmistajillekin. Kierrätysalan yritykset tarvitsevat tietoa laitteiden mahdollisista purkutavoista ja laitevalmistajat siitä, kuinka kierrätettävyys voidaan ottaa huomioon jo laitesuunnittelussa.

Tavoitteena on hyödyntää tämän demon tuloksia ja pyrkiä muodostamaan Porin seudulle magneettien kierrättämisen liiketoimintaekosysteemi. Peittoon kierrätyspuisto tarjoaa hyvät puitteet tulevaisuudessa esimerkiksi tuuligeneraattoreiden ja vastaavien purkamiselle ja kierrättämiselle.

Magneettien kierrätys Prizztechissä



Kuva 18. Sintrattujen NdFeB magneettien kierrättämiseen liittyvä tutkimus- ja testaustyö, jossa Prizztech Oy on mukana.

5. Lähteet

- [1] www.kone.com/fi/yhtio/innovaatiomme
- [2] www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/2005-01-27/Kestomagneettimoottori-tulee-suurteollisuuteen-3269382.html
- [3] REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review, Yang et al., Journal of Sustainable Metallurgy, (2017) 3:122–149
- [4] Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material, Schulze and Buchert, Resources, Conservation and Recycling 113 (2016) 12–27
- [5] Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe, Dominique Guyonnet, Mariane Planchon, Alain Rollat, Victoire Escalon, Johann Tuduri, et al., Journal of Cleaner Production, Elsevier, 2015, 26 p.
- [6] Microstructure and magnetic properties of grain boundary modified recycled Nd-Fe-B sintered magnets, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, M. Zakotnik, D. Prosperi, P. Afiuny, C.O. Tudor, K. Hono, Journal of Alloys and Compounds 694 (2017) 175–184
- [7] Analysis of energy usage in Nd–Fe–B magnet to magnet recycling, Miha Zakotnik, Catalina O. Tudor, Laura Talens Peiró, Peter Afiuny, Ralph Skomski, Gareth P. Hatch, Environmental Technology & Innovation 5 (2016) 117–126
- [8] Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling, Hongyue Jin, Peter Afiuny, Timothy Mc Intyre, Yuehwn Yih, John W. Sutherland, Procedia CIRP 48 (2016) 45 – 50
- [9] Kriittiset metallit ja huoltovarmuus, Jarkko Vesa, Huoltovarmuusorganisaatio, 2017