

# TIEKARTTA YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN PIENENTÄMISEKSI

CASE: TULENKESTÄVIEN MATERIAALIEN TUOTANTO



# TAUSTAA

Energiaintensiivinen teollisuus on yksi suurimmista energian kuluttajista. Se kuluttaa globaalisti noin 24 % energiasta. Tästä yli 80 % tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla ja niihin liittyvillä energiajärjestelmillä

[\(Margaritis et al. 2022\)](#)

Tulenkestävien materiaalien markkinat ovat suuresti riippuvaisia rauta- ja terästeollisuudesta, joka käyttää 60 % materiaaleista.

40% jakautuu loppukäyttäjäteollisuudelle kuten energiantuotanto, sementti-, lasi-, värimetalli-, petrokemikaali-, kemia-, paperi- ja selluteollisuudelle.

Rauta- ja terästeollisuuden muutokset aiheuttavat muutoksia tulenkestävien materiaalien markkinoissa.

Euroopan näkökulmasta haaste on se, että valtaosa raaka-aineesta on Kiinan tuonnin varassa.

[\(Refractories Market Global Forecast to 2025\)](#)

## Tuotannossa syntyä

Orgaanisia hiukkasia



murskauksessa, jauhamisessa, kalsinoinissa ja kuivaamisessa.

Haitallisia kaasuja



poltto-, tervaus- ja pikivaiheissa.

[\(Refractories Market Global Forecast to 2025\)](#)

# TULENKESTÄVÄT MATERIAALIT

## Ominaisuuksia:

- Korkea sulamispiste
- Pitävät rakenteensa myös korkeissa lämpötiloissa

## Käyttö:

- Terästeollisuudessa
- Teollisuudessa, jossa tarvitaan polttouuneja
- Metalliteollisuudessa sekä primääri- että sekundääriteräksen valmistuksessa
- MgO-C-pohjaisia tulenkestäviä materiaaleja käytetään laajalti teräsmetallurgiassa
- Sulan rikin poistoon tavallisesti käytettäviä reagensseja ovat natriumkarbonaatti ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), CaSi, metallikalsium, kalsiumkarbidi ( $\text{CaC}_2$ ) ja magnesium (Mg)

TULENKESTÄVIEN MATERIAALIEN TUOTANTO ON  
MAAILMANLAAJUISESTI

30-40

MILJOONAA TONNIA VUOSITTAIN.

(Horckmans et al. 2019, [Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review – ScienceDirect](#))

KÄYTETTYÄ MATERIAALIA SYNTYY NOIN

28

MILJOONAA TONNIA.

PYROMETALLURGINEN TEOLLISUUS VOI MERKITTÄVÄSTI  
EDISTÄÄ YMPÄRISTÖVASTUULLISUUTTAAN LISÄÄMÄLLÄ  
TULENKESTÄVIEN TIILIEN KIERRÄTYSTÄ.

([Kumar et al. 2016](#))

“VAIN REILU 5-7% RAAKA-MATERIAALIN KYSYNNÄSTÄ  
TÄYTETÄÄN KIERRÄTETYILLÄ MATERIAALEILLA JA  
TÄLLÄ KATETAAN VAIN MUUTAMIA SOVELLUKSIA, JOTEN  
PALJON MATERIAALIA MENEÉ HUKKAAN.”

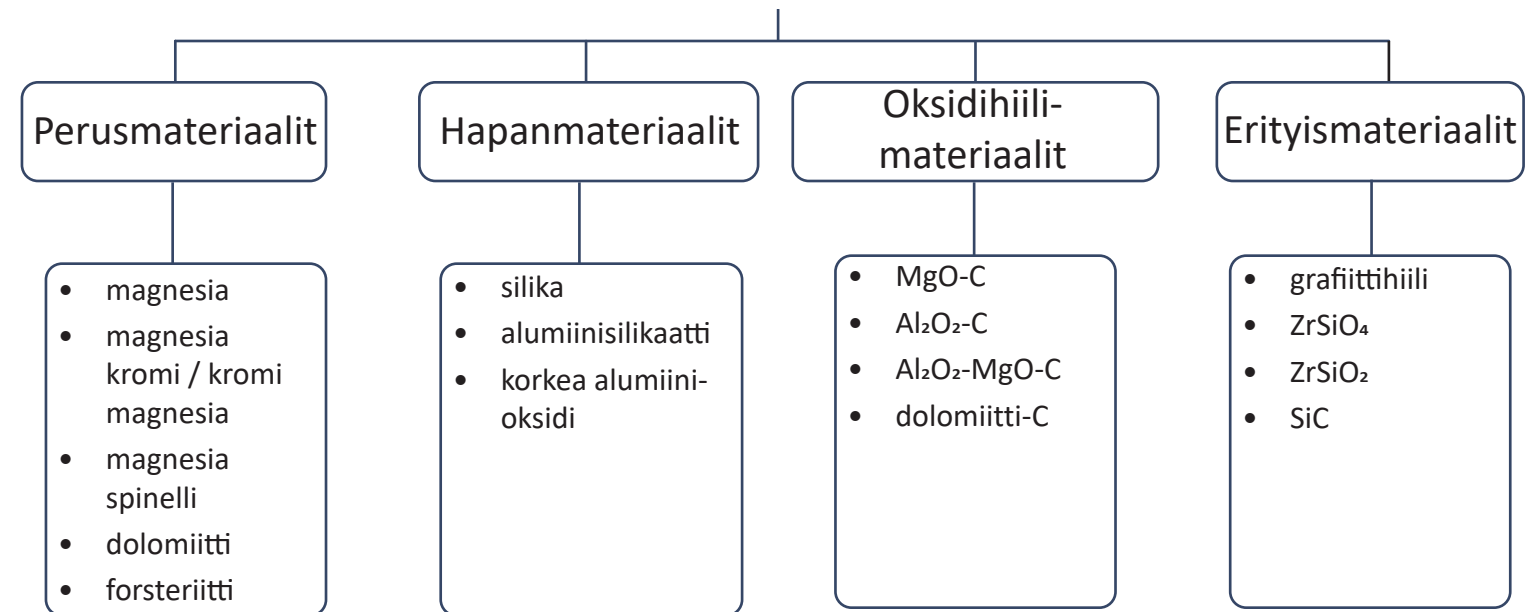
Liesbeth Horckmans, REFASORT Project Coordinator

# TULENKESTÄVÄT MATERIAALIT

ASTM C71 määritelmä:

Ei-metallisia materiaaleja, joilla on sellaisia kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia, että ne ovat soveltuvia rakenteisiin ja komponenttien osiksi, jotka altistuvat yli 538 °C (1000 F) lämpötiloille

## Tulenkestävät materiaalit jaoteltuna koostumuksen mukaan



Tulenkestävien materiaalien luokittelu koostumuksen perusteella, ISO-luokittelun mukaisesti. RIGAUD, M.A. and LANDY, R.A. (eds.), Pneumatic Steelmaking Volume Three Refractories, Iron and Steel Society, 1996

**Perusmateriaaleja** käytetään pääasiassa alkalisen teräksen valmistusuuneissa, ei-rautametallien sulatusuuneissa ja sementtiuuneissa.

**Hapanmateriaalit** ovat materiaalia, jonka SiO<sub>2</sub>-pitoisuus on yli 93%

**Erityismateriaalit** on kehitetty perinteisen keramiikan ja yleisten tulenkestävien materiaalien perusteella.

Tulenkestävien materiaalien tyypit ja ominaisuudet - Uutiset - Greenergy tulenkestävät ja eristysmateriaalit Co., Ltd. ([greenergyrefractories.com](http://greenergyrefractories.com))



# TYÖVÄLINEITÄ JA KÄSITTEITÄ YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOIMISEEN

## Life Cycle Assessment / Elinkaariarviointi

menetelmä tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten analysointiin ja arviointiin  
Elinkaariarviointia toteutetaan erilaisin rajauksin, joissa voidaan ottaa huomioon

- kaikki suorat päästöt, jotka ovat yrityksen hallinnassa
- myös epäsuorat päästöt, joihin lukeutuvat muiden tuottamat hyödykkeet ja tarvikkeet
- sekä muut epäsuorat päästöt, jossa luetaan mukaan myös yrityksen toiminnasta ja tuotteista aiheutuvat, mutta epäsuorasti hallittavissa olevat päästöt.

ISO14040-sarjan standardit: "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework"

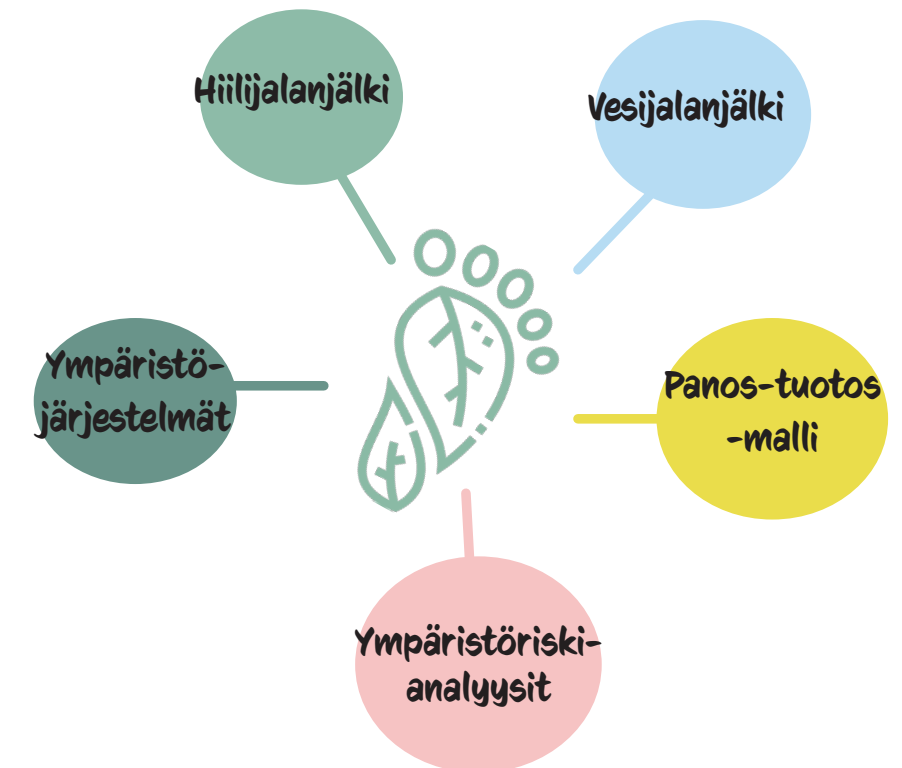
## Global Warming Potential / GWP

= indeksi / kerroin, joka kertoo aineen kasviuonehaitallisuuden. Muiden aineiden arvoja verrataan hiilidioksiidiin / CO<sub>2</sub>, jonka GWP-arvo on 1.0. GWP lasketaan tietyllä aikavälillä, yleensä 100 vuoden ajalle laskettuna arvona. Asteikko on 0:sta ylöspäin.

(Kylmäaineiden ympäristövaikutusten tunnusluvut : ODP, GWP, TEWI • Darment)

## Hiilidioksidiekvivalentti CO<sub>2</sub>ekv

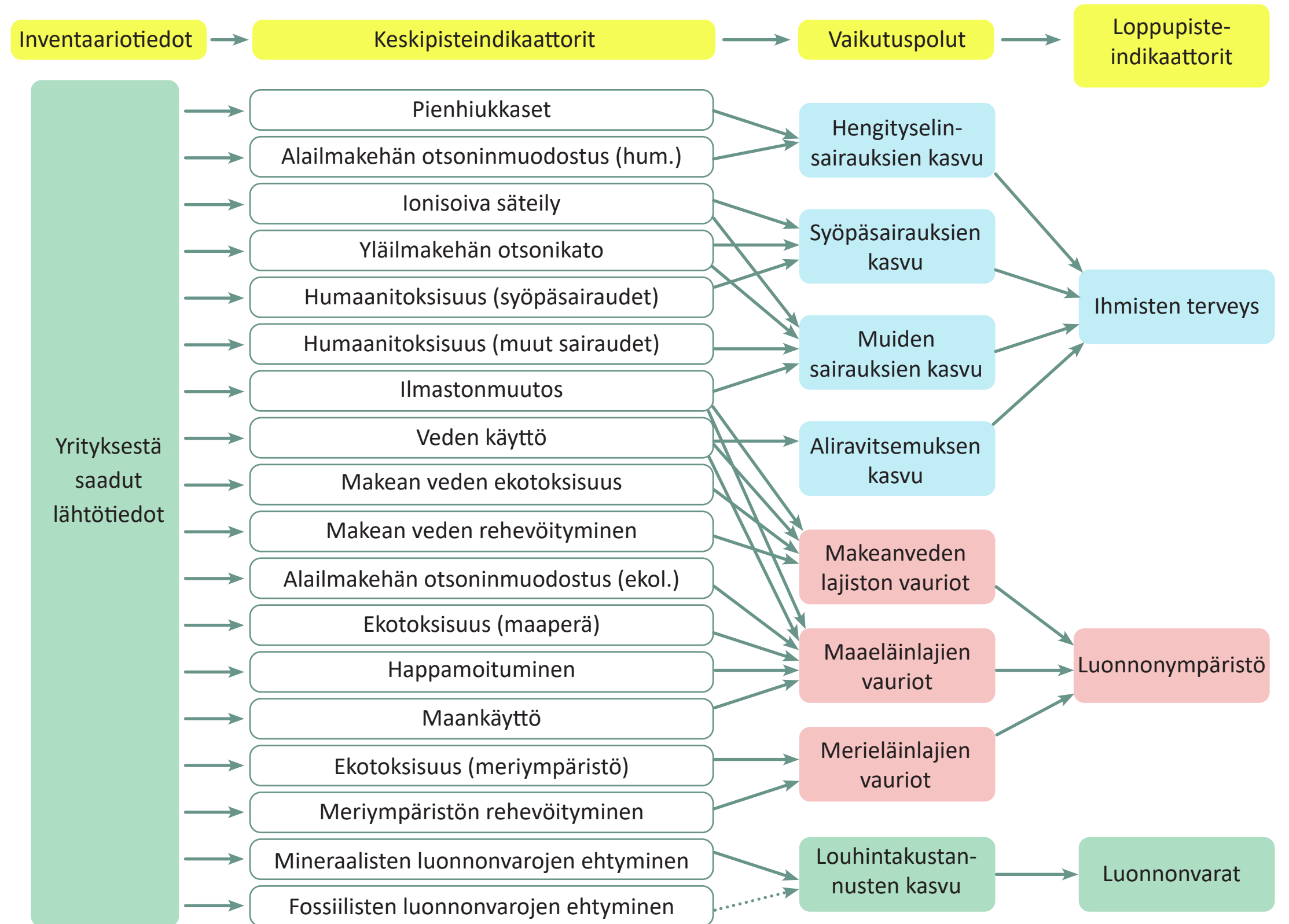
Kasviuonekaasut ilmaistaan hiilidioksidiekvivalentteina. Hiilidioksidin ekvivalenttipäästöihin lasketaan hiilidioksidipäästöt sellaisenaan, metaanipäästöt (CH<sub>4</sub>) kerrottuna luvulla 25 ja typpioksiduulipäästöt (N<sub>2</sub>O) kerrottuna luvulla 298. Nämä kertoimet kuvaavat kyseisten yhdisteiden vaikuttavuutta kasviuoneilmiöön hiilidioksiidiin verrattuna (LIPASTO ([vtt.fi](http://vtt.fi)))



Lähde: [Ymparisto > Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotosmalli](#)

ELINKAAREN AIKAISIA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA VOIDAAN TODENTAA NUMEERISIKSI ARVOIKSI SIMULOINTIOHJELMIEN AVULLA.

OSA ELINKAARIANALYYSIN TULOKSINA SAADUISTA ARVOISTA KUVAA KESKIPISTEINDIKAATTOREITA ELI VAIKUTUSLUOKKIA (TOIMINNAN VAIKUTUKSIA YMPÄRISTÖLLE) JA OSA LOPPUPISTEINDIKAATTOREITA ELI HAITTOJA (JOS TOIMINTA TOTEUTUU)



# JÄRJESTELMÄN RAJAUS

## Kehdosta tehtaan lähtöportille -mallinnus

### Upstream:

- mineraalisten ja muiden raaka-aineiden louhinta, prosessointi, valmistus ja kuljetus:
- murskaus, jauhatus, seulonta, lämpökäsittelyt, sähkö, lämpö
- kuljetus tuotantoon (laiva, rekka-auto, ym.)
- noin 20 keskeisen raaka-aineen mallinnus, esim. MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, viisi erilaista kierrätysmateriaalia, silikaatit, muut

### Core: yrityksen sisäinen tuotanto raaka-aineista tuotteiksi:

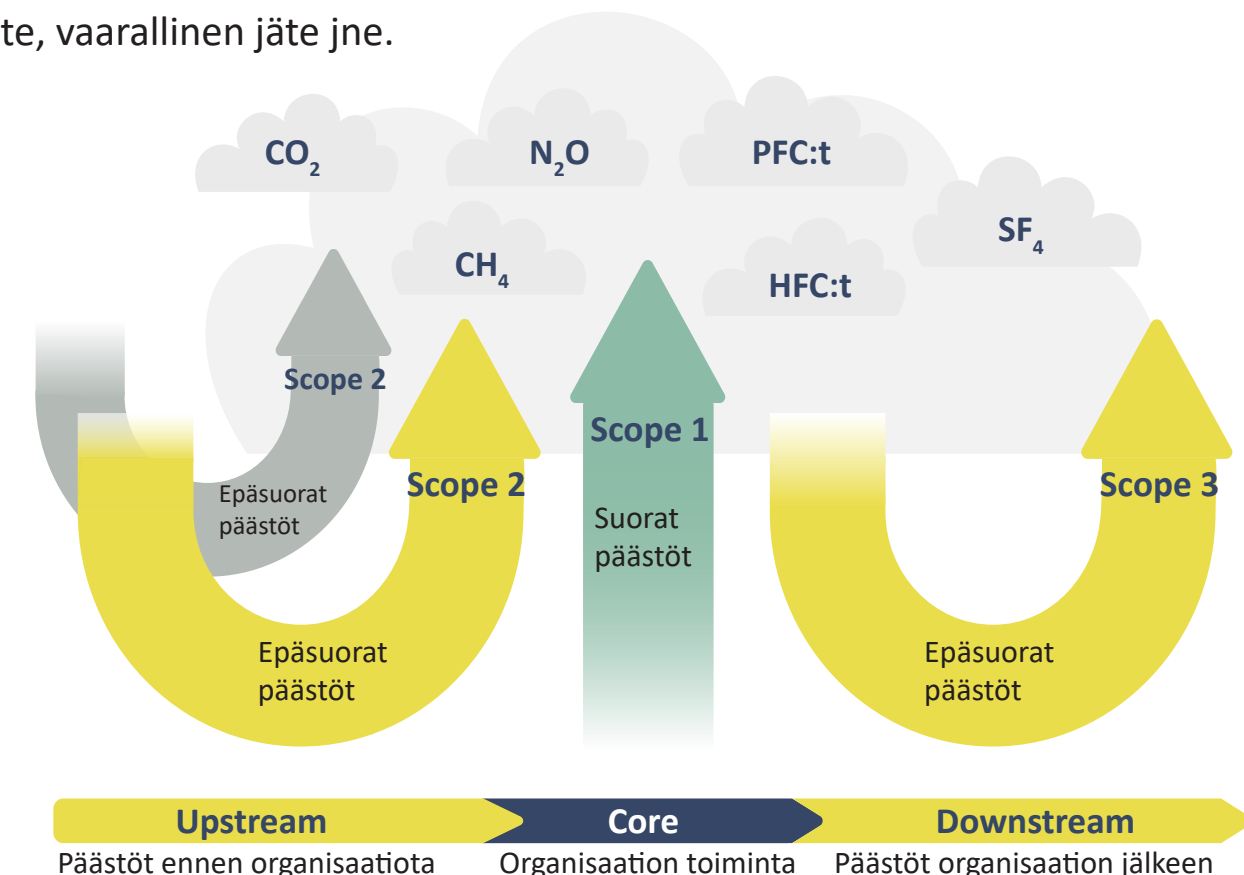
- polttoaineet, lämpö ja sähkö: käyttö prosessointiin, kierrätysmateriaalien lajitteluun ja käsittelyyn
- käyttöhyödykkeet, materiaalit: jako (allokointi) tuotteille, esim. suursäkit, tavaralavat, sähkö, lämpö ja prosessivesi tuotekohtaisesti
- raaka-aineiden kuljetuskilometrien jako tuotekohtaisesti
- lähes 30 tuotteen koostumus määritettiin simulointiohjelmaan

### Downstream:

- sivutuotteiden ja jätteiden hyödyntäminen / uudelleenkäyttö / käytöstä poistuminen
- mineraalisten sivutuotteiden hyödyntäminen maanrakennuksessa
- metallit
- biojäte
- puu- ja muovimateriaalien energiakäyttö
- sekajäte, vaarallinen jäte jne.

Laskennan toiminnallinen yksikkö on yksi tonni tulenkestäviä tuotteita.

Raaka-aineiden hiilijalanjälki on laskettu tonnia kohti jokaista raaka-ainetta ilman kuljetusten ympäristövaikutuksia ja lisäksi maa- ja merikuljetusten hiilijalanjälki on laskettu tonnikipometriä kohti kuljetuksia.



# KIERRÄTTETTÄVÄT TULENKESTÄVÄT MATERIAALIT

Kierrätetyn tulenkestävän materiaalin käyttö raakamateriaalina on haastavaa, koska käytettyjä materiaaleja on vaikea erottaa toisistaan tyyppin ja laadun mukaan. Materiaalit ovat myös kontaminoituneet käytön aikana, mikä vaikeuttaa tulenkestävien materiaalien korkeiden laatuvaatimusten täyttämistä. Käytettyjen materiaalien metallipitoisuuksissa on eroja ja niiden kestävyys on epäpuhtauksista johtuen heikompi.

Nousevat raaka-ainekustannukset sekä rahdin ja ympäristön tuomat paineet kasvattavat kiinnostusta kierrätetyn materiaalin käyttöön ja yritykset etsivät kestäviä vaihtoehtoja tulenkestäville sovelluksille.

[Refractories Market Global Forecast to 2025 | MarketsandMarkets \(8.11.22\)](#)

Kierrätetyn materiaalin käyttö riippuu laadusta: korkealaatuinen kierrätetty tulenkestävä materiaali voidaan käyttää täysin uudelleen toisissa prosesseissa.

Matalan laadun materiaaleista vain 0-30% voidaan jatkohyödyntää.

[Horckmans 2019](#)



**ILMASTO**  
INDIKAATTORI

## Kierrätysprosessi

### Esilajittelu

Materiaalin tyyppin mukaan

### Epäpuhtauksien poisto

Murskaus, seulonta, magneettierottelu, värierottelu

## Avoin kierrätys:

Kuonahoitoaineissa dolomiittikalkin korvaamisen MgO-C:llä on osoitettu kasvattavan MgO-pitoisuutta ja sitä kautta pidentävän tulenkestävän aineen käyttöikä.

Kierrätyskromimetallien tuotannossa käytettyä magnesiumoksidi-kromia käytetään kierrätysklinkkerin (sementin) valmistuksen raaka-aineena.

## Suljettu kierrätys:

**Kromipohjaiset:** Kierrätys haastavaa mutta menetelmiä on olemassa. Esimerkiksi Cr-tulenkestävän aineen valmistus pienemmällä määrällä kuusiarvoista kromia ja yhdistämällä tähän käytettyä Cr-pohjaista materiaalia (Tokunaga and Kawahara, 2002).

**Magnesiittipohjaiset** (käytetyin tulenkestävä materiaali): Magnesia-hiili (MgO-C) -tiilet on kierrätetty jo 1990-luvun puolivälistä lähtien.

**Alumiinioksidi:** Tulenkestävä savi (samotti, bauksiitti). Esim. kierrätetyllä Al-spinellikiviaineella voitaisiin korvata 20% Al-granulasta ilman merkittäviä muutoksia ominaisuuksissa tai kestävydessä (Nakamura et al. 1999).

Jotkut materiaalit eivät ole kierrätettävissä teknisten seikkojen vuoksi (Esim. dolomiitti nesteytyy) tai matala-arvoisuuden vuoksi (samotti).

[Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review - ScienceDirect](#)



# TULENKESTÄVIEN MATERIAALIEN TUOTANNON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA

Materiaali- ja energiatehokkuutta hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten minimoimisella - Ilmastoindikaattori -hankkeessa vertailtiin materiaalituotannon neitseellisten ja kierrätysraaka-aineiden ympäristövaikutuksia tehdasta tehtaan lähtöportille.

	yli 80 % kierrätys- materiaalia	100 % neitseellistä raaka-ainetta
Ilmastonmuutos, kg CO <sub>2</sub> eq	489,2	1669,6
Pienhiukkasten lisääntymispotentiaali, kg PM <sub>2,5</sub> eq	0,6	2,7
Mineraalisten luonnonvarojen vähenemä, kg Cu eq	14,9	91,2
Fossiilisten luonnonvarojen vähenemä, kg öljy eq	119,5	529,1
Vedenkulutus, m <sup>3</sup>	3,4	10,6

Kierrätysraaka-  
aineiden käyttö  
vähentää  
neitseellisten raaka-  
aineiden käyttöä

Kuljetuksen  
ympäristövaikutukset  
pienenevät, jos kierrätysraaka-  
aineet saadaan lähempää kuin  
neitseellinen materiaali, mutta  
ne vaativat lisäprosessointia  
ennen käyttöä

Neitseellisten raaka-  
aineiden prosessoinnin  
ympäristövaikutukset  
poistuvat (esim. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:n  
ja MgO:n prosessoinnin  
käyttämä lämpöenergia  
ja CO<sub>2</sub>-päästöt)

# TULENKESTÄVIEN MATERIAALIEN TUOTANNON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA

Tulenkestävän materiaalin tuotannon hiilijalanjälki pieneni kolmasosaan kierrätysmateriaalia käytettäessä.

Maakuljetusten rekka-autojen päästötaso ei vaikuta merkittävästi hiilijalanjälkeen. Kuitenkin kuljetusmuodolla voi olla vaikutusta neitseellisen ja kierrätetyn raaka-aineen hiilijalanjäljen eroihin, jos neitseellinen raaka-aine tulee laivalla bulkkikuljetuksena. Laivan bulkkikuljetuksen hiilijalanjälki on vain 1/15-1/25-osa rekkakuljetuksen hiilijalanjäljestä.

Louhittavien, murskattavien, jauhettavien ja seulottavien neitseellisten mineraalisten raaka-aineiden hiilijalanjälki on hyvin pieni, muutama kymmenen kiloa CO<sub>2</sub>-ekvivalenttia tonnia kohti raaka-ainetta. Jos raaka-aine pitää vielä lämpökäsitellä, hiilijalanjälki nousee vähintään 1500-3000 kiloon. Tällaisia raaka-aineita ovat mm. MgO ja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eri laatuineen, ja juuri näiden raaka-aineiden kierrättäminen tuo suurimmat säästöt ympäristövaikutuksiin.

# TIEKARTAN TOTEUTUS

**centria**  
ammattikorkeakoulu

Materiaali- ja energiatehokkuutta hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten minimoimisella - ILMASTOINDIKAATTORI -hanke

<https://net.centria.fi/hanke/ilmastoindikaattori/>

Toteutusaika: 3/2021 - 5/2023

Rahoitus: Euroopan aluekehitysrahasto, Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto

**Vipuvoimaa**  
EU:lta  
2014–2020