

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 1(39)
---	---	--	-----------------------

Metallituotteiden suorakerrostuskorjauksen taloudelliset ja ympäristövaikutukset

Erik Haapa

Turun Yliopisto



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

SISÄLLYSLUETTELO

1. Esipuhe	3
2. Johdanto	4
3. Elinkaarilaskennan menetelmä	5
3.1 Tavoitteet ja rajaukset	5
3.2 Toiminnallinen yksikkö	7
3.3 Suorakerrostustekniikat	8
3.4 Materiaalit	9
4. Laskentatyökalun kuvaus	10
4.1 Rakenne	10
4.2 Elinkaari-inventaario, LCI	11
4.2.1 Parametrit	11
4.2.2 Energiankulutus	17
4.2.3 Kustannukset	18
5. Laskennan tulokset	20
5.1 Energiankulutus	20
5.2 Kustannukset	25
6. Tulosten tulkinta	30
6.1 Trendit ja kannattavuus	30
6.2 Tulosten oikeellisuus	34
7. Johtopäätökset	36
Lähteet	37



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 3(39)
---	--	--	---------------

1. Esipuhe

Lukijalle

Tämä tekninen raportti on osa julkisten tietopakettien sarjaa, joka on tuotettu Metallituotteiden uusi elämä -hankkeessa (hankekoodi A80607) hankeen työpakettien tuloksien levittämiseen yrityksille ja muille sidosryhmille.

Metallituotteiden uusi elämä on Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoituksen saanut hanke, joka on osa Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027 –ohjelmassa tehtävää kehittämistoimintaa. Hankkeen kesto oli 1.1.2024 – 30.6.2026. Hankkeen osarahoittajana on ollut Euroopan unioni ja rahoittavana viranomaisena Varsinais-Suomen liitto. Hanke toteutettiin ryhmähankkeena yhteistyössä Turun ammattikorkeakoulun ja Turun yliopiston kanssa sekä yhteistyössä erityisesti Varsinais-Suomen valmistavan teollisuuden yritysten kanssa. Hankkeen kokonaistavoiteena oli saada suomalainen ja erityisesti Varsinais-Suomen alueen teollisuus käyttämään suorakerrostustekniikkaa osien korjaamiseen, kunnostukseen ja uudelleentalmistamiseen ja sitä kautta yritykset ottamaan kiertotalouden näkökulma osaksi heidän liiketoimintamalliaan.

Terveisin,

Turun ammattikorkeakoulun ja Turun yliopiston hanketiimien työpakettien tekemiseen osallistuneet työryhmän henkilöt



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 4(39)
--	---	--	-----------------------

2. Johdanto

Valmistavan teollisuuden siirtymä kohti kiertotaloutta edellyttää uudenlaista ajattelua ja konkreettisia teknologisia ratkaisuja. Suorakerrostustekniikat (Directed Energy Deposition, DED) tarjoavat yhden tällaisen ratkaisun: mahdollisuuden korjata, kunnostaa ja uudelleenvalmistaa teollisuuden komponentteja sen sijaan, että kuluneet tai vaurioituneet osat korvattaisiin uusilla. Teknologia on kypsää ja sen teknis-taloudelliset hyödyt on osoitettu lukuisissa kansainvälisissä sovelluksissa, mutta sen käyttöönotto suomalaisessa teollisuudessa, erityisesti pk-yrityksissä, on toistaiseksi ollut vähäistä.

Tämä raportti on tuotettu osana EU:n osarahoittamaa Metallituotteen Uusi Elämä-hanketta, jonka tavoitteena on edistää suorakerrostustekniikan käyttöönottoa komponenttien korjauksessa ja uudelleenvalmistuksessa suomalaisessa teollisuudessa.

Hankkeessa autetaan esim. hitsausalan toimijoita tunnistamaan tämä liiketoimintapotentiaali heidän tuotannostaan ja samalla saadaa kiertotalous osaksi heidän liiketoimintamalliaan. Hankkeen toimenpiteet voidaan tiivistää kolmeen osaan:

- Haasteiden tunnistaminen ja niiden purkaminen tiedon jakamisen avulla.
- Teollisuuden kanssa yhteistyössä tehtävät case-esimerkit, joilla testataan ja todennetaan korjaamistekniikan toimimista todellisissa tuotteissa ja ympäristöissä.
- Ympäristövaikutusten arviointi ja liiketoimintamallien kehittäminen, jossa etsitään teollisuudelle sellaisia liiketoimintamalleja, jotka kannustavat yrityksiä ottamaan kiertotalouden osaksi liiketoimintaansa.

Hankkeen tulokset julkaistaan teknisinä raportteina, jotka on suunnattu ensisijaisesti valmistavan teollisuuden toimijoille. Kukin raportti käsittelee yhtä tai useampaa edellä mainittua näkökulmaa. Raportit yhdessä muodostavat kokonaisuuden, joka tukee yrityksiä suorakerrostuspohjaisen korjauksen arvioinnissa, käyttöönotossa ja liiketoiminnallisessa hyödyntämisessä.

Tämä raportti esittelee hankkeessa tuotetun elinkaarilaskentatyökalun ja sen avulla lasketun esimerkkitapauksen. Laskennan tulosten perusteella arvioidaan suorakerrostuskorjauksen kannattavuutta kustannus- ja ympäristövaikutusnäkökulmasta eri skenaarioissa.

Metallituotteen Uusi Elämä-hankkeen toteuttaa Turun ammattikorkeakoulu ja Turun yliopisto. Hanke on Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittama osana EU:n alue- ja rakennepoliitiikan ohjelma ”Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027”:ää aikavälillä 1.1.2024 – 30.6.2026.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

3. Elinkaarilaskennan menetelmä

Elinkaarilaskenta, englanniksi Life Cycle Assessment (LCA) viittaa tuotteen tai palvelun koko elinkaaren ympäristövaikutusten laskentaan. Ympäristövaikutusten lisäksi termiin liitetään usein myös elinkaarikustannusten laskenta, Life Cycle Costing (LCC). Elinkaarilaskenta voidaan tehdä tuotteen koko elinkaarelle alkutuotannosta käytöstä poistoon asti (Cradle to Grave) tai rajatumminkin huomioimatta tuotteen käyttöä tai käytöstä poistoa (Cradle to Gate).

Elinkaarilaskennan olennaiset askeleet ISO 14040-standardin mukaisesti ovat:

1. Tavoitteiden ja rajausten asettaminen
2. Elinkaari-inventaarion tekeminen (Life Cycle Inventory, LCI), eli tuotteeseen liittyvien virtojen ja niiden yksittäisten elinkaarivaikutusten selvittäminen
3. Elinkaarivaikutusten laskenta
4. Tulosten tulkinta

Vaiheet 1 ja 2 vastaavat laskennan menetelmän määrittelyä, jota käsittelee raportin kappaleen 2. alakappaleet 2.1 ja 2.2. Vaiheet 3 ja 4 vastaavat tuloksia ja niiden analysointia, jotka käydään läpi raportin kappaleissa 3. ja 4.

Tässä raportissa kuvailtu elinkaarilaskenta on tehty käyttäen Metallituotteen Uusi Elämä-hankkeessa luotua suorakerrostuskorjauksen LCA/LCC laskentatyökalua, ja toimii myös työkalun dokumentaationa.

3.1 Tavoitteet ja rajaukset

Laskennan tavoitteena on tarjota yritysten päätöksenteon tueksi keskenään vertailukelpoisia, suuntaa-antavia arvioita suorakerrostuskorjauksen kustannuksista ja ympäristövaikutuksista. Erityisesti laskentamallin fokuksena on mahdollistaa eri suorakerrostusmenetelmien, materiaalien, ja parametrien välisten erojen hahmottaminen.

Absoluuttisen tarkkoja arvioita kustannuksista tai ympäristövaikutuksista on vaikea antaa, sillä esimerkiksi kustannuksiin liittyy merkittäviä epävarmuustekijöitä joita on mahdoton arvioida etukäteen, esimerkiksi tilakustannusten, katteiden, ja raaka-aineiden tai energian hintaan liittyen. Palveluntarjoajalla on todennäköisesti myös käytössä vähimmäislaskutussumma, joka voi luoda ns. kovan pohjan pienten osien korjauskustannuksille. Samoin ympäristövaikutusten suuruus riippuu suuresti esimerkiksi



**Euroopan unionin
osarahoittama**

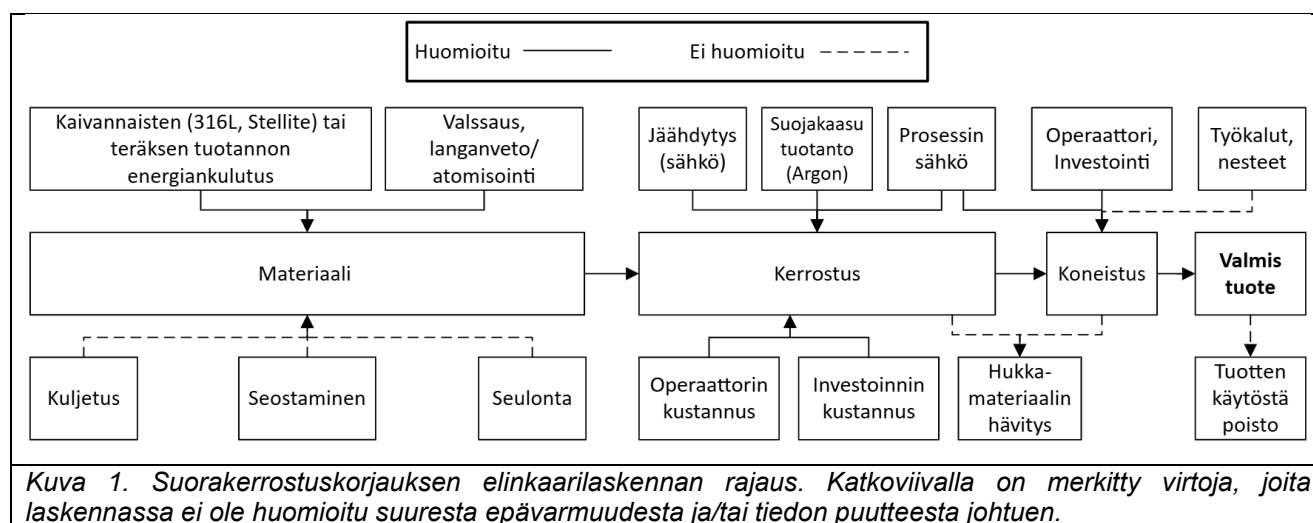


**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

raaka-aineiden ja energian tuotantotavoista. Hankkeessa kehitetty laskuri tarjotaan avoimesi yritysten käyttöön, jolloin oletuksia ja arvoja voidaan muokata omiin tilanteisiin sopivasti.

Korjauksen vaikutuksia ja kustannuksia verrataan usein uuteen osaan. Tässä laskelmassa ei pyritä arvioimaan uuden osan hintaa, joka riippuu täysin osan luonteesta, laadusta, yrityksen tarpeista ja hankintakanavista. Uuden osan arvioitu hinta oletetaan olevan laskentatyökalua käyttävän yrityksen tiedossa.

Laskennassa käytetyn elinkaarilaskennan rajaukset ovat esitetty Kuvassa 1.



Kuten Kuvasta 1 nähdään, elinkaarilaskenta huomioi kattavasti materiaaliin ja itse kerrostusprosessiin liittyviä kustannuksia ja ympäristövaikutuksia, mutta jättää joitain virtoja huomioimatta, kuten kuljetuksen, hukkamateriaalin hävittämisen, ja tuotteen käytöstä poiston. Kuljetus ja hukkamateriaali ovat erityisen epävarmat virrat, ja niiden sisäisesti riippuvuus paikallisista polttoaineista ja kierrätyskäytännöistä on suurta. Lisäaineen seostus ja jauheen seulonta valmistusvaiheina on myös jätetty huomiotta tiedon puutteen vuoksi. Hukkamateriaalin, kuten koneistuslastujen, kierrätystä ei ole huomioitu, tai pikemminkin kierrätysprosessien ja uusiokäyttöön pääsevän materiaalin nettovaikutuksen on oletettu olevan neutraali. Tuotteen käytöstä poistoa ei ole huomioitu, sillä oletusarvoisesti tuotteen käytöstä poisto ei eroa ainakaan negatiivisesti tilanteesta, jossa tuotetta ei korjata vaan se hävitetään heti.

3.2 Toiminnallinen yksikkö

Elinkaariarvio lasketaan aina kohti tiettyä funktionaalista yksikköä. Tässä laskelmassa käytetään hankkeessa tuotettua elinkaarivaikutuslaskuria, jossa lasketuksi kappaleeksi asetetaan pelkkä pinta-ala ja pinnoituspaksuus. Tällöin funktionaaliseksi yksiköksi tulee pinnoitettu tilavuus. Tässä julkaisussa annetut esimerkkilaskelmat on toteutettu Taulukossa 1 annettuja mittoja vastaavalle sylinterille.

Taulukko 1. Elinkaariarviossa käytetyn geometrian mitat.

Geometria	Pituus	Halkaisija	Pinnoituspaksuus
”tela”	400 mm	300 mm	1 mm

Taulukon 1 geometriat huomioidaan siis vain pinta-alan ja pinnoituspaksuuden osalta, eikä pituuden tai halkaisijan suhteella ole merkitystä. Eri mittoja käytetään havainnollistamaan kahden ”tyyppituotteen” eroja, etenkin kun pinta-alan ja pinnoituspaksuuden suhde muuttuu merkittävästi.

Elinkaarivaikutuksia kvantifioidaan indikaattoreilla, eli ympäristövaikutusta kuvaavalla mittarilla. LCA-laskelmassa indikaattoreina käytetään usein esimerkiksi kgCO₂eq:tä (päästö joka vastaa kiloa hiilidioksidia). Tämä arvo on johdettu suorien päästöjen lisäksi kulutetusta energiasta huomioiden energiamuodon. Tällöin eri tuotteiden vaikutusta ympäristöön tai ilmastoon voidaan vertailla suoraan, ja esimerkiksi jonkin valinnan päästövaikutus on konkreettinen. Yksikön haittapuolena on kuitenkin läpinäkymättömyys ja johdannaisuus; se sisältää paljon tulkinnanvaraa ja on herkkä muutoksille. Esimerkiksi mikäli jonkin laskelman syötteenä toimivan komponentin valmistusmaata muutetaan, ei kgCO₂eq-arvo todennäköisesti pidä enää paikkaansa. Päästökertoimien määrittäminen kulutetulle energialle luo myös yhden kerroksen epävarmuutta, sillä ne perustuvat keskiarvoihin ja oletamiin esimerkiksi energiantuotannosta, olosuhteista, ja käyttövoimasta, jotka voivat muuttua voimakkaasti lyhyessäkin ajassa energiamurroksen ja kehittyvien talouksien teollistumisen myötä.

Näiden epävarmuustekijöiden, yksikön ajallisen vanhenemisen, sekä datan rajatun saatavuuden vuoksi tässä laskelmassa ympäristövaikutuksia arvioidaan kussakin vaiheessa kuluneen primäärienergian (MJ) kautta. Energian kulutus on yksiselitteinen yksikkö, jonka avulla laskurin käyttäjä voi myöhemmin laskea toteutuneet kasvihuonekaasupäästöt käyttämällä ajantasaisia tietoja esimerkiksi kohdemaan sähköntuotannosta ja soveltuvia GWP-kertoimia (global warming potential). Suuren energiankulutuksen voi myös melko intuitiivisesti katsoa liittyvän raskaampaan teolliseen toimintaan ja jonkin luonnonvaran kulumiseen. Poikkeuksena tähän voi lukea suorakerrostukseen Suomessa kulutetun sähkön, joka on valtaosin uusiutuvaa tai ydinvoimalla tuotettua. Toisaalta sähkönkulutuksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

on häviävän pieni, kuten kappaleessa 3 todetaan. Kustannukset tässä laskelmassa on arvioitu euroissa (2025).

3.3 Suorakerrostustekniikat

Suorakerrostus, englanniksi directed energy deposition (DED) on lisäävän valmistuksen (teollinen 3D-tulostus) alakategoria, joka sisältää useita eri teknologioita. Yhteistä niille on, että kappale luodaan lisäämällä ainetta haluttuun paikkaan kerros kerrokselta, niin että lisäaine ja energia syötetään samanaikaisesti. Käytännössä puhutaan siis kappaleen muodostamisesta kerroksittain hitsaamalla. Pääasiassa eri suorakerrostustekniikat eritellään ISO/ASTM 52900:2021 standardin mukaisesti energialähteen ja lisäaineen perusteella; energialähde, yleisimmin laser tai valokaari, ilmoitetaan tekniikan nimessä lyhenteellä ”-LB” ja ”-Arc” vastaavasti. Lisäaine, käytännössä jauhe tai lanka, ilmoitetaan teknologian nimessä muodolla ”/powder” tai ”/wire” vastaavasti.

Tyypillisimmät energialähde-lisäaine -yhdistelmät ovat laser-jauhe (DED-LB/powder), laser-lanka (DED-LB/wire) ja valokaari-lanka eli DED-Arc. ISO-standardin termien rinnalla on hyvin tyypillistä nähdä kauppanimiä, joita ovat laserpohjaisille tekniikoille esim. LMD tai LENS ja DED-Arc:ille WAAM.

Tässä elinkaarilaskelmassa sovelletaan kolmea yleisintä suorakerrostustekniikka, jotka ovat listattu Taulukossa 2.

Taulukko 2. Elinkaariarviossa käytetyt tekniikat ja niiden ominaisuudet.

Tekniikka	Kuvaus	Vaikutus kustannuksiin	Vaikutukset ympäristöön
Laser-jauhe (DED-LB/powder)	Tarkka, mutta matalampi tuottavuus. Pieni lämmöntuonti ja tunkeuma.	Atomisoitu jauhe on kalliimpaa kuin lanka. Materiaalihukkaa tulee noin 50%. Hitaampi prosessi.	Atomisointi vie energiaa, ja yhdessä korkeamman materiaalihukan kanssa johtaa korkeaan energiankulutukseen
Laser-lanka (DED-LB/wire)	Melko tarkka, parempi tuottavuus kuin jauheella, pieni materiaalihukka	Halpa lisäaine (lanka) ja pieni materiaalihukka pienentää kustannuksia	Pienempi materiaalista johtuva energiankulutus pienemmän hukan ja langan vuoksi
Valokaari-lanka (DED-Arc)	Melko epätarkka, suuri tuottavuus, suuri lämmöntuonti, usein vaatii runsasta koneistusta	Laitteisto ja lisäaine on halpa, mutta materiaalihukka on geometriasta riippuen suurta. Vaatii paljon koneistusta.	Mahdollinen materiaalihukka kasvattaa energiankulutusta jos pinnoituspaksuus on pieni



3.4 Materiaalit

Elinkaarilaskentaan valittiin kolme materiaalia, jotka ovat suomalaiselle teollisuudelle relevantteja, usein suorakerrostuskorjauksessa käytettyjä, sekä riittävän erilaisia toimiakseen reunaehtoina punnittaessa materiaalin vaikutusta suorakerrostuskorjauksen kustannuksiin tai ympäristövaikutuksiin. Materiaalit ja niiden yleiskuvaukset on annettu Taulukossa 3.

Taulukko 3. Elinkaariarviossa käytetyt seokset ja niiden ominaisuudet.

Seos	Kuvaus	Vaikutus kustannuksiin	Vaikutukset ympäristöön
Teräs (hitsauslanka, matalaseosteinen rakenneteräs)	Oletetaan toimivan ”entistä vastaavaan” kuntoon palauttavana lisäaineena korjauksessa	Halvin vaihtoehto	Merkittävät hiilidioksidipäästöt. Toisaalta verrattavissa uuden teräsosan materiaalin päästöihin.
316L ruostumaton teräs	Kestää korroosiota mutta ei erityisen kulutuskestävä	Kalliimpi kuin rakenneteräs	Hieman suuremmat ympäristövaikutukset johtuen lisäaineista
Stellite kobolttikromiseos	Kestää erittäin hyvin kulutusta ja korroosiota	Kallein tutkittu vaihtoehto	Koboltin, kromin, ja muiden lisäaineiden ympäristövaikutukset suuret. Toisaalta pidentää osan elinikää.

Kuten Taulukosta 3 käy ilmi, elinkaarilaskentaan on sovellettu kolme pinnoitusmateriaalia; teräs, ruostumaton teräs, ja Stellite-kobolttikromiseos. Näistä teräs edustaa geneeristä matalaseosteista rakenneterästä (S235, S355) tai hitsauslankaa (esim ER70S) joka toimii halvimpana vaihtoehtona, palauttaen tuotteen suurin piirtein aiempaa vastaavaan kuntoon ilman eliniän parannusta.

Ruostumaton teräs (316L) edustaa vaihtoehtoa jolla voidaan parantaa tuotteen korroosionkestoa, tai korjata tuotteita jotka ovat alun perin valmistettu kyseisestä seoksesta. Tässä laskelmassa ruostumattomalle teräkselle ei ole oletettu merkittävää eliniän parannusta, vaikka tapauskohtaisesti korroosionkesto saattaakin pidentää elinikää tai vähintäänkin pienentää huoltokustannuksia.

Stellite on kaupp nimi perheelle kobolttikromiseoksia, joita käytetään erityisesti pinnoituksessa. Seos on kallista, mutta erittäin hyvin kulutusta ja korroosiota kestävä. Tässä elinkaarilaskennassa seos edustaa toista ääripäätä halvalle matalaseosteiselle teräkselle, jolla tuotteen elinkaarta voidaan merkittävästi parantaa.



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

4. Laskentatyökalun kuvaus

Hankkeen tavoitteena oli kehittää teollisuuden käyttöön laskentamalli kiertotalousmenetelmien taloudellisen kannattavuuden ja ympäristövaikutusten arviointiin. Tätä varten tuotettiin korjauksen elinkaaren kustannus- ja ympäristövaikutuksia (LCA/LCC) halutulle korjaustapaukselle laskeva laskentataulukko. Taulukko on julkaistu osana hankkeen julkaisusarjaa nimellä "DED-korjauksen_LCA-LCC-laskenta.xlsx".

Valinta toteuttaa laskenta helposti muokattavassa ja ymmärrettävässä taulukossa, läpinäkyvästi avoimesti saatavilla olevaan dataan perustuen on tietoinen valinta. LCA-laskenta toteutetaan usein kaupallisella ohjelmalla tapauskohtaisesti, mutta tarkka tapauskohtainen laskenta tässä yhteydessä ei palvele hankkeen tarkoituksia. Yhden korjaustapauksen tulokset eivät yleensä kerro paljoa toisen tapauksen kannattavuudesta. Mukautettava ja vertailukelpoisuuteen panostava taulukko taas antaa pk-yritykselle hyvän lähtökohdan kustannus- ja ympäristövaikutuslaskennan aloittamiseen DED-korjauksen tueksi.

4.1 Rakenne

Laskentatyökalu "DED-korjauksen_LCA-LCC-laskenta.xlsx" koostuu useasta välilehdestä, joiden toiminta selitetään alla.

- UI
 - o Käyttöliittymä johon annetaan käyttäjän syötteet
- Materiaali
 - o Matriisi josta laskentataulukko hakee materiaaliikohtaiset parametrit
- Laskenta
 - o Laskentataulukko, joka sisältää parametrit ja laskukaavat kappaleen korjauksen/pinnoituksen LCA/LCC laskentaan
- Energia
 - o Tulostesivu joka sisältää laskentataulukkojen tuottamat energiankulutusta (LCA) kuvailevat taulukot
- Kustannus
 - o Tulostesivu joka sisältää laskentataulukkojen tuottamat korjauskustannuksia (LCC) kuvailevat taulukot

Yksinkertaisimmillaan käyttäjän tarvitsee vain syöttää oman tapauksensa tiedot UI-välilehdelle. Laskentatyökalun käyttäjän oletetaan tietävän korjattavan pinnan ala sekä korjauksen/pinnoituksen paksuus. Hankkeen haastatteluiden ja yrityskyselyn perusteella



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivun 11(39)
---	--	--	-----------------

suurin osa korjatuista kappaleista on pyörähdysymmetrisiä, jota heijastaen laskurissa kappale syötetään sylinterinä. Laskuri toimii pinta-alapohjaisesti, joten muilla geometrioilla laskuria voidaan joko muokata tai haluttu pinta-ala muuntaa vastaavaksi sylinterin vaipaksi.

Pinnoituksen paksuus lasketaan määrittämällä alkuperäinen kappaleen halkaisija sekä kuluman syvyys ja esikoneistuksen määrä. UI-välilehdellä kappaleen koko syötetään sylinterinä, mutta lopulta vain pinta-alalla ja paksuudella on merkitystä; käyttäjä voi helposti muuttaa näiden laskennan Laskenta-välilehdellä vastaamaan haluamaansa geometriaa.

Esikoneistuksen määrä arvioidaan kuluman tasaisuuden perusteella; kuinka paljon materiaalia tulee poistaa, jotta saadaan aikaiseksi tasainen, puhdas pinta. Kunkin suorakerrostustekniikan kerrospaksuus ja minimiylimitta ovat myös käyttäjän syötteitä. Taulukko sisältää ehdotukset tyypillisiksi arvoiksi joita voidaan käyttää mikäli todellinen arvo ei ole tiedossa.

Laskentataulukkojen tietoja on mahdollista muokata, jos yrityksen sisäisen tai palveluntarjoajan käyttämän suorakerrostuslaitteen parametrit ovat tiedossa, tai esimerkiksi hintatietoja halutaan tarkentaa. Tällöin on tärkeää huomioida mihin soluun arvot syötetään. Tyypilliset tapauskohtaiset, materiaalista riippumattomat muuttujat, kuten laitteiston hinnat ja operaattorin kulut, syötetään kunkin DED-tekniikan sarakkeeseen suoraan (keltainen solun taustaväri). Materiaalikohtaiset tiedot, kuten prosessiparametrit, poimitaan materiaalmatriisista UI-välilehdellä valitun materiaalin mukaan (solun punainen taustaväri). Valkoiset solut ovat laskentasoluja, jotka noutavat arvoja muista soluista.

4.2 Elinkaari-inventaario, LCI

Elinkaari-inventaario, eli Life Cycle Inventory, viittaa laskennan käyttämiin arvoihin eri virtojen energiankulutuksille ja kustannuksille (Kuva 1). Elinkaari-inventaarioon luetaan kuuluvaksi myös suorakerrostusprosessien parametrit, jotka määräävät mm. käytetyn sähkötehon, suojakaasun kulutuksen, ja prosessin keston. Laskelmassa käytetyt arvot pohjautuvat saatavissa olevaan tieteelliseen kirjallisuuteen, ja toissijaisesti etenkin kustannusten suhteen arvioille ja vapaasti saatavilla oleviin hintatietoihin. Arvojen lähteet on eritelty seuraavien alakappaleiden taulukoissa.

4.2.1 Parametrit

Laskennassa käytetyt prosessiparametrit ovat haettu tieteellisestä kirjallisuudesta jokaiselle suorakerrostustekniikalle – materiaali yhdistelmälle erikseen. Poikkeuksena on DED-LB/wire



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 12(39)
---	---	--	------------------------

suorakerrostus, jolle ei löytynyt riittävän yksityiskohtaista ja soveltuvaa parametrisaatiota Stellitelle eikä teräkselle, jolloin 316L-ruostumattoman teräksen arvoja käytetään myös näille materiaaleille. Ero teräkseen ja Stelliteen on todennäköisesti pieni etenkin huomioiden prosessien välillä ilmenevät välillä merkittävätkin erot laitevalmistajien välillä. Suurimmaksi tästä olettamasta aiheutuvaksi virheeksi arvioidaan se, että Stelliteen verrattuna 316L-prosessissa liikenopeus ja tuottavuus on todennäköisesti hieman suurempi ja sähkönkulutus pienempi, johtaen hieman aliarvioituun energiankulutukseen ja prosessin kestosta johtuviin kustannuksiin.

Parametrien arvot esitetään Taulukoissa 4-6.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

Taulukko 4. Suorakerrostusprosessien parametrit teräkselle.

	Teräs			Yksikkö
Lähde	Queguineur et al. 2025	Ascari et al 2020	Bernauer et al. 2024	
Tekniikka	DED-Arc	DED-LB powder	DED-LB wire	
Vähimmäisylimitta	1.5	0.5	0.5	mm
Kerrospaksuus	3	1	1	mm
Jännite	18			V
Virta	175			A
Teho	3150	3000	1200	W
Hyötysuhde	0.8	0.45	0.45	%
Liikenopeus	11.6	27	16.6	mm/s
Langan säde	1.2		1	mm
Langansyöttö	83.3		18.3	mm/s
Jauheensyöttö		14.6		g/min
Suojakaasuvirta	20	27	20	l/min



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

Taulukko 5. Suorakerrostusprosessien parametrit 316L- ruostumattomalle teräkselle.

	316L			Yksikkö
Lähde	Lipiäinen et al. 2024	Ascari et al 2020	Bernauer et al. 2024	
Tekniikka	DED-Arc	DED-LB powder	DED-LB wire	
Vähimmäisylimitta	1.5	0.5	0.5	mm
Kerrospaksuus	3	1	1	mm
Jännite	16.5			V
Virta	130			A
Teho	2145	3000	1200	W
Hyötysuhde	0.8	0.45	0.45	%
Liikenopeus	7.15	27	16.6	mm/s
Langan säde	1		1	mm
Langansyöttö	133.3		18.3	mm/s
Jauheensyöttö		14.6		g/min
Suojakaasuvirta	24	27	20	l/min



Taulukko 6. Suorakerrostusprosessien parametrit Stellite-kobolttikromiseokselle.

	Stellite			Yksikkö
Lähde	Lin et al. 2020	Kiehl et al. 2023	Bernauer et al. 2024	
Tekniikka	DED-Arc	DED-LB powder	DED-LB wire	
Vähimmäisylimitta	1.5	0.5	0.5	mm
Kerrospaksuus	3	1	1	mm
Jännite	18.2			V
Virta	180			A
Teho	3276	3000	1200	W
Hyötysuhde	0.8	0.45	0.45	%
Liikenopeus	25	13.3	16.6	mm/s
Langan säde	1.2		1	mm
Langansyöttö	67		18.3	mm/s
Jauheensyöttö		25		g/min
Suojakaasuvirta	20	9.5	20	l/min



Suorakerrostusprosesseihin ja lisäaineen valmistukseen liittyy erilaisia materiaalihävikin mekanismeja, jotka ovat esitelty taulukossa 7.

Taulukko 7. Prosessien ja lisäaineen valmistuksen materiaalihukka.

Prosessi	Hukka	Lähde
Valssaus	5%	(Priarone et al. 2020)
Langanveto	12%	(Priarone et al. 2020)
Atomisointi	5%	(Ehmsen et al. 2025)
DED-LB/powder	50%	(Koti et al. 2023)
DED /wire	5%	(Priarone et al. 2019)

Kuten Taulukosta 7 nähdään, huomioituja hävikkejä ovat valssauksen ja lisäaineen valmistuksen (langanveto tai atomisointi) hävikki sekä itse suorakerrostuksesta syntyvä hävikki. Lankapohjaisissa prosesseissa hävikkiä aiheuttavat satunnaisten langanpätkien hukan lisäksi roiskeet ja haihtuminen. Jauhepohjaisissa prosesseissa, tässä tapauksessa DED-LB/powder, suuri osa metallijauheesta (prosessista riippuen 20-80%, oletettu keskimäärin 50%) ei osu laserin sulattamaan pohjametalliin. Ohi mennyt jauhe päättyy laitteen tyypistä riippuen hitsaussolun lattialle tai suljetun DED-laitteen kammion pohjalle. Laitteiden ja solujen eroista johtuen on vaikea arvioida, kuinka suuri osuus tästä materiaalista voidaan käyttää uudelleen seulonnan jälkeen. Johdonmukaisuuden säilymiseksi tässä laskelmassa on oletettu, ettei sulan ohi mennyttä jauhetta uudelleenkäytetä. Kaikki käytetyt metallit oletetaan käyvän valssausvaiheen läpi, sisältäen uuden osan teräksen, atomisoidun jauheen, ja langan. Toisin sanoen valssauksen energiankulutus ja hukkaprosentti lisätään kaikkiin materiaalivirtoihin.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

4.2.2 Energiankulutus

Seosten valmistukseen kuluva energia on laskettu niiden sisältämien aineiden massaprosenttien perusteella. Seosaineiden energiankulutukset sekä lisäaineiden tai uuden kappaleen valmistukseen kuluvan energian määrät per kilogramma ovat esitetty Taulukossa 7.

Taulukko 7. Eri aineiden tuotannon ja jalostuksen energiankulutus per kg.

Materiaali	Arvo	Yksikkö	Lähde
Ar (suojakaasu)	0.009	MJ/l	(Dopler & Weiß, 2021)
N (suojakaasu – ei käytetty laskennassa)	0.0018	MJ/l	(Dopler & Weiß, 2021)
Fe	25	MJ/kg	(Van der Voet et al. 2018)
Ni	280	MJ/kg	(Van der Voet et al. 2018)
Co	121	MJ/kg	(Rinne et al. 2021)
Cr	32.8	MJ/kg	(Wei et al. 2023)
W	396	MJ/kg	(Feix & Hache 2025)
Al	175	MJ/kg	(Van der Voet et al. 2018)
Valssaus	20.7	MJ/kg	(Priarone et al. 2020)
Langanveto	15.6	MJ/kg	(Priarone et al. 2020)
Atomisointi	50	MJ/kg	(Dopler & Weiß 2021)

Ennen ja jälkeen suorakerrostuksen suoritetaan mittaan koneistus, jonka nopeus ja energiankulutus riippuu käytetystä materiaalista. Taulukossa 8 esitellään laskuissa käytetyt arvot ja energiankulutuksen arviointiin käytetty kaava. Huomionarvoista on että todellinen energiankulutus on laitekohtaista, ja erittäin herkkä tehtävän viimeistelyn määrälle; mitä tarkempi viimeistely, sen suurempi energiankulutus per kg.



Taulukko 8. Koneistukseen käytetyn ajan ja energian laskukaava ja arvot.

Koneistus	Stellite	Teräs	316L	Yksikkö
Aineenpoisto, MRR	4 (Hasan et al. 2016)	25 (Velchev et al. 2014)	10 (Krolczyk et al 2015)	cm3/min
Koneistuksen energia	2.093 + 4.415 / MRR (Li & Kara 2011)			kJ/cm3
	7.67	1.61	3.58	MJ/kg

4.2.3 Kustannukset

Kuluja ja kustannuslähteitä laskennassa kostuu eri kulutustarvikkeista, työtunneista, sähköstä, sekä laitteiston amortisoinnista. Esimerkiksi katteita, kuljetuskustannuksia, tai tiloihin liittyviä kuluja ei ole huomioitu niiden tapauskohtaisuuden vuoksi.

Eri tekniikat soveltuvat erilaisiin korjauskohteisiin, geometrioihin, ja lisäaineisiin, ja niillä saattaa olla eri vaatimukset tilojen tai henkilösuojauksen kannalta, mutta näitä tekijöitä ei ole huomioitu laskelmissa. Laskelmissa oletetaan kaikkien järjestelmien olevan lisäävän valmistuksen käyttöön soveltuvia ja saman hintaisia, johtuen erittäin suuresta hintahaitarista kullekin tekniikalle. Huomionarvoista on, että DED-Arc laitteisto voi yksinkertaisimmillaan olla tavallinen hitsausrobotti, jolloin itse järjestelmän hankintakustannus on pieni. Vastaavasti laser-jauhe järjestelmät ovat monimutkaisempia, ja jauheen käsittely vaatii omaa infrastruktuuriaan. Todellisuudessa investointikustannusten trendi on siis DED-Arc < DED-LB/wire < DED-LB/powder.

Käytetyt kustannukset käyvät ilmi taulukosta 9. Suurin osa arvoista pohjautuu vähittäismyynnin listahintoihin tai keskimää räisiin arvioihin. Hinnat ovat verottomia.



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

Taulukko 9. Elinkaarilaskennassa käytetyt kustannukset kulutustarvikkeille ja investoinneille.

Hinnat	Stellite	Teräs	316L	Yksikkö
Lanka	65	2	15	€/kg
Jauhe	170	50	100	€/kg
Argon	20 (pullon täyttö)			€/m3
CO2	10 (pullon täyttö)			€/m3
DED-laitteisto	400 000			€
CNC-keskus	200 000			€
Sähkö sis. siirto	0.15			€/kWh
Operaattori	40			€/h
Amortisointi	8			v
Käyttöaste	2000			h/v
Käyttökustannukset	5% * investointi			1/v
Operaattorin työaika per osa	30% * prosessin kesto + 1h			h



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

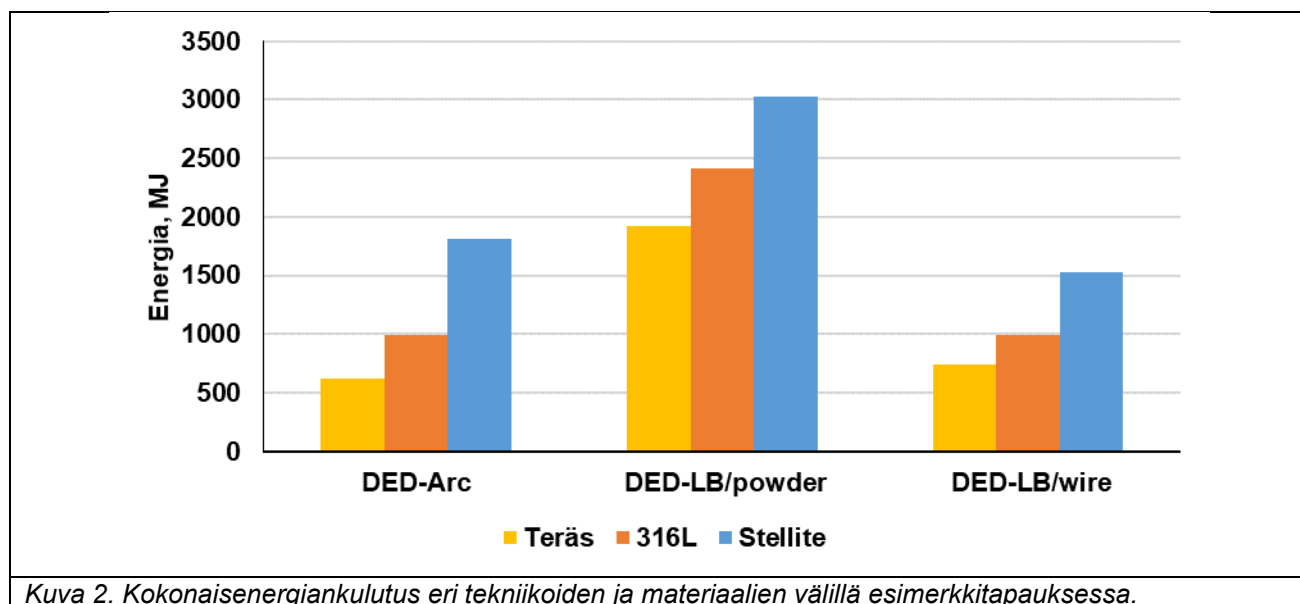
5. Laskennan tulokset

Laskentatyökalun tuottamia tuloksia havainnollistetaan kahdella laskennallisella esimerkkitapauksella, jotka on valittu edustamaan DED-korjauksen tyypillisiä mutta toisistaan poikkeavia käyttötilanteita. Esimerkkitaustien lähtötiedot ovat fiktiivisiä, mutta ne on mitoitettu vastaamaan realistisia suuruusluokkia kirjallisuuden ja käytännön kokemusten perusteella. Esimerkkien tarkoituksena ei ole tuottaa yleistettäviä arvoja DED-korjauksen kannattavuudesta, vaan osoittaa miten laskentatyökalu toimii, millaisia tuloksia se tuottaa ja miten tuloksia voidaan tulkita osana korjauspäätöksen valmistelua.

Elinkaarivaikutukset laskettiin kolmelle skenaariolle; entiseen kuntoon palautus (korjaus teräksellä), korjaus korroosiota kestäväällä ruostumattomalla teräksellä, ja ”mitä-jos” skenaario, jossa tuotteen elinkaarta pidennetään käyttämällä Stellite-kobolttikromiseosta teräksen sijaan.

5.1 Energiankulutus

Korjauksen kokonaisenergiankulutus vaihtelee merkittävästi tekniikoiden ja materiaalien välillä, kuten Kuva 2 tiivistää.



Kuten kuvasta 2 näkee, energiankulutus riippuu voimakkaasti käytetystä materiaalista ja lisääintyyppistä. Teräs, erityisesti lankamuodossa, on energiatehokkain materiaali. 316L ruostumattoman teräksen energiankulutus on hieman korkeampi, ja Stelliten edelleen ruostumatonta korkeampi. Lankapohjaisten prosessien DED-Arc ja DED-LB/wire



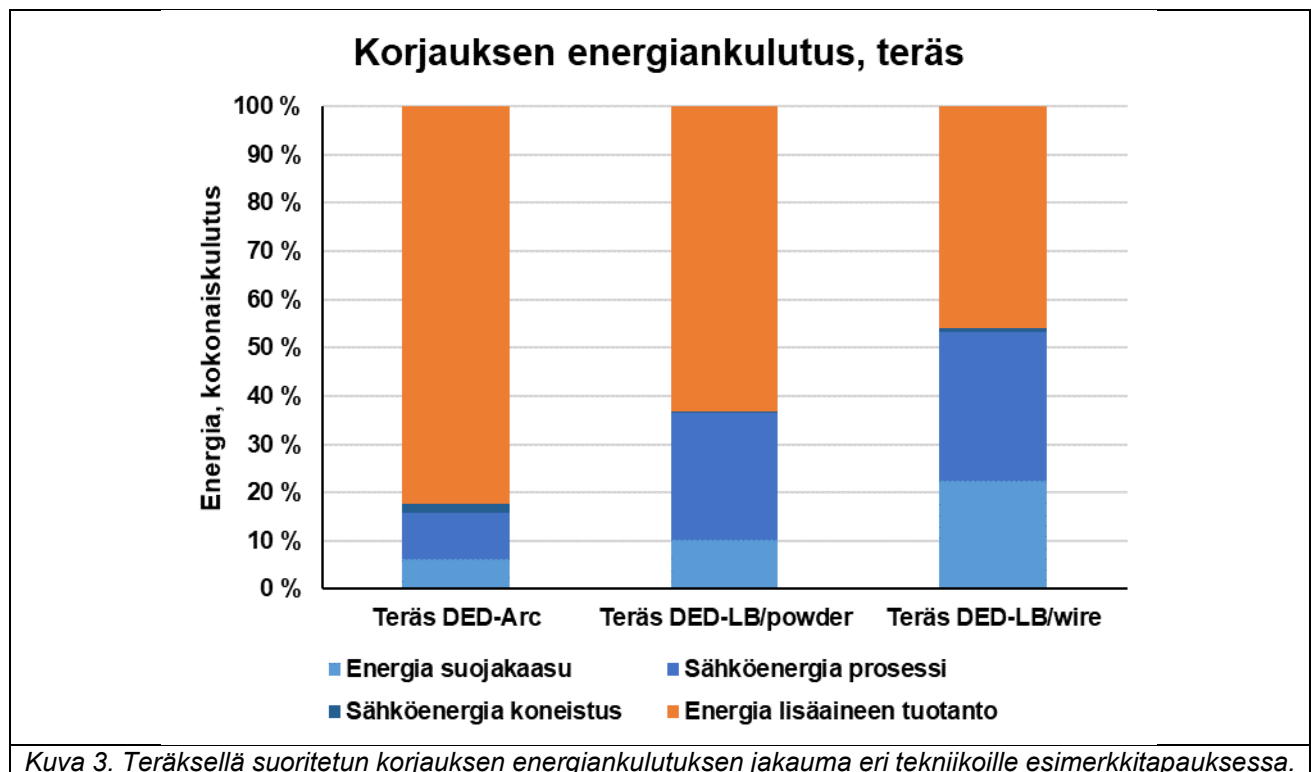
**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

energiankulutus on karkeasti saman tasoinen; Stelliten tapauksessa nähdään hienoinen noin 300MJ ero DED-LB/wire:n eduksi.

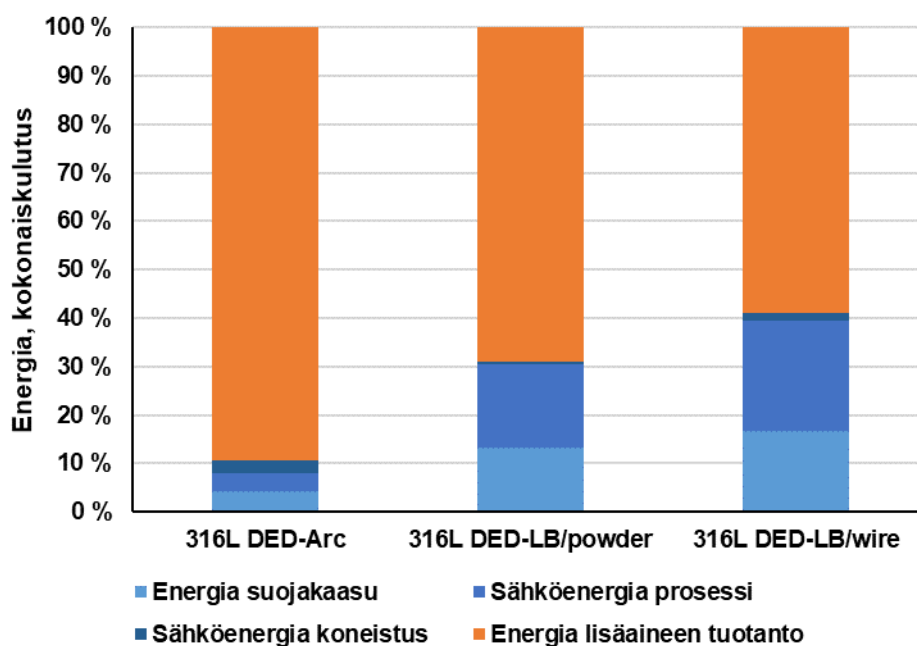
Kuvan 2 tiivistelmästä ei käy ilmi mistä erot johtuvat, ja miksi prosessit reagoivat eri materiaaleihin hieman eri tavoin. Näitä tekijöitä tarkastellaan Kuvissa 3-5 materiaalikohteisesti.



Kuten Kuvasta 3 nähdään, lisäaineen tuotanto ja erityisesti teräksen tuotanto muodostaa merkittävän osuuden korjauksen energiankulutuksesta. Tämä korostuu DED-Arc ja DED-LB/powder -tekniikoiden tapauksessa, joissa syntyy materiaalihukkaa ylittävän ja sulan ohi suihkutetun jauhon vuoksi. DED-LB/wire tekniikassa materiaalihukkaa syntyy vähemmän, jolloin prosessiin liittyvien virtojen vaikutus korostuu suhteessa materiaaliin.

Sama trendi jatkuu ruostumattoman teräksen tapauksessa kuten nähdään Kuvasta 4.

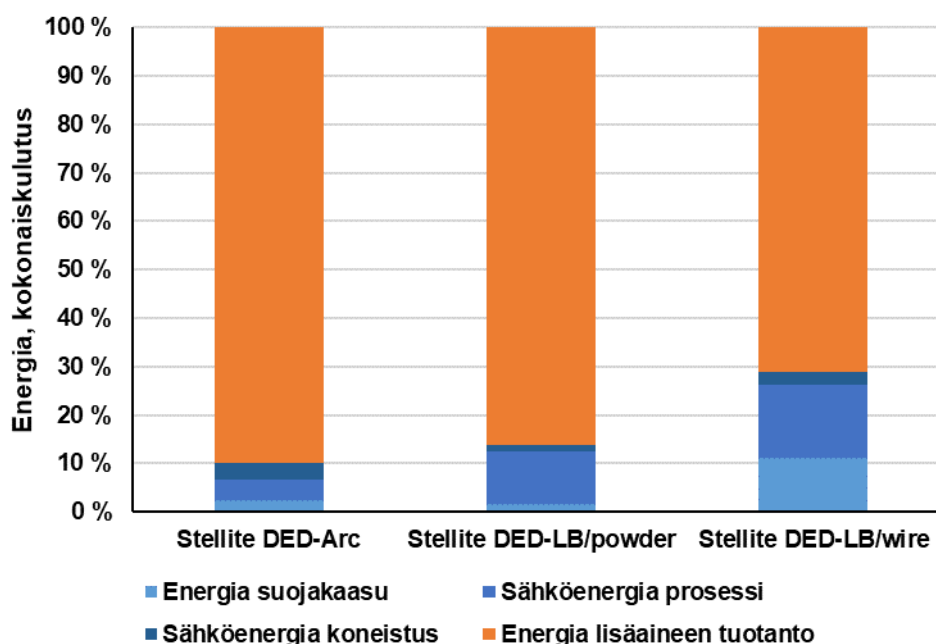
Korjauksen energiankulutus, 316L



Kuva 4. 316L:llä suoritettujen korjauksien energiankulutuksen jakauma eri tekniikoille esimerkitapauksessa.

Ruostumattoman teräksen tuotanto on tavanomaista matalaseosteista terästä energiantensiivisempää, joka heijastuu Kuvassa 4 noin 5-10 prosenttiyksikköä korkeampana materiaalin osuutena kaikilla tekniikoilla.

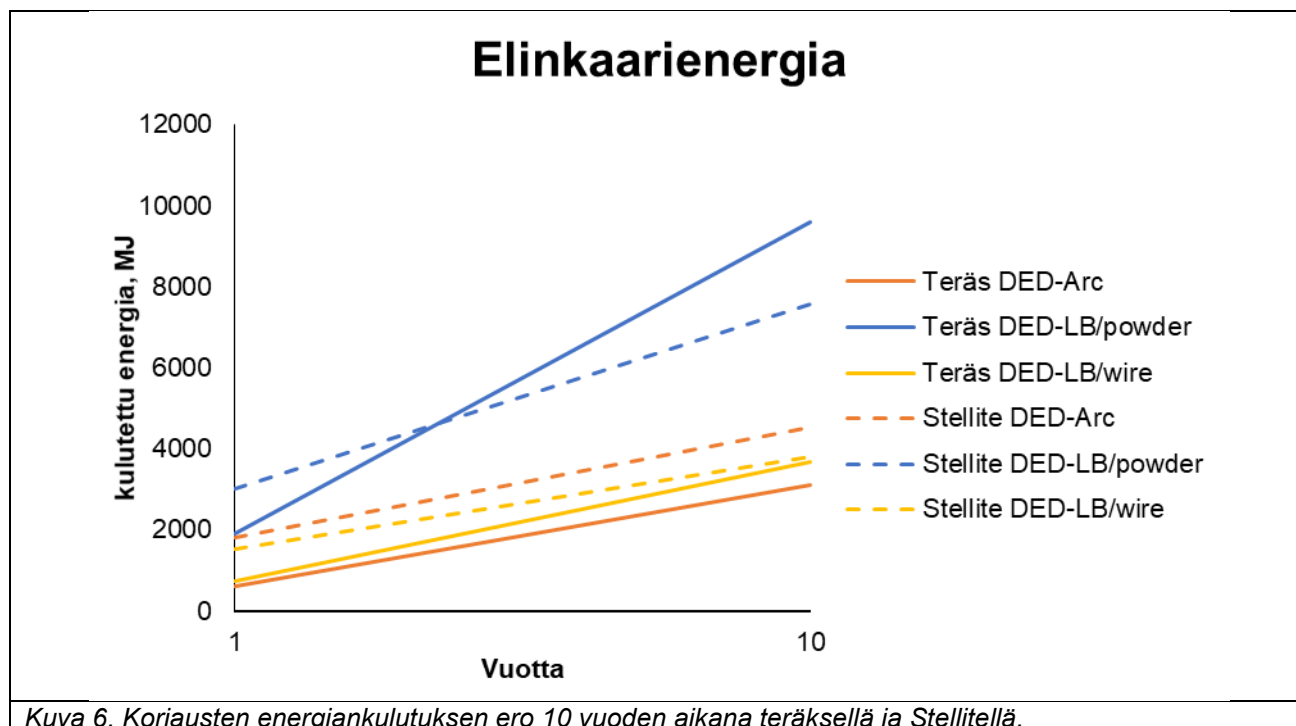
Korjauksen energiankulutus, Stellite



Kuva 5. Stellitellä suoritetun korjauksen energiankulutuksen jakauma eri tekniikoille esimerkkitapauksessa.

Kuten Kuvasta 5 nähdään, siirryttäessä ruostumattomasta teräksestä Stelliteen, materiaalin osuus kokonaisenergiankulutuksesta kasvaa jopa 10-20 prosenttiyksikköä kaikilla tekniikoilla lukuun ottamatta DED-Arc:ia. Tämä johtuu kokonaisuudessaan kasvavasta energiankulutuksesta Stelliten tapauksessa, jolloin kaikkien virtojen osuus kasvaa lähes käsi kädessä. Erityisesti koneistuksen osuus energiankulutuksesta kasvaa johtuen Stelliten heikosta koneistettavuudesta. Kokonaisuudessaan energiankulutus DED-Arcin tapauksessa kasvaa siis merkittävästi siirryttäessä Stelliteen, sillä sekä materiaaliin että prosessiin liittyvät energiavirrat kasvavat.

Stelliten energiankulutus on siis merkittävästi suurempi verrattuna teräkseen, ja etenkin DED-Arc:in tapauksessa energiankulutuksen kasvuun on paineita sekä materiaali- että prosessipuolelta. Toisaalta Stelliten korkea kulutuksen- ja korroosionkesto saattaa parantaa tuotteen tai osan elinaikaa ja vähentää korjauskertojen tarvetta, näin vähentäen elinkaaren aikana korjauksiin kulutettua energiaa. Tämän oletaman testauksen tulokset ovat esitetty Kuvassa 6.

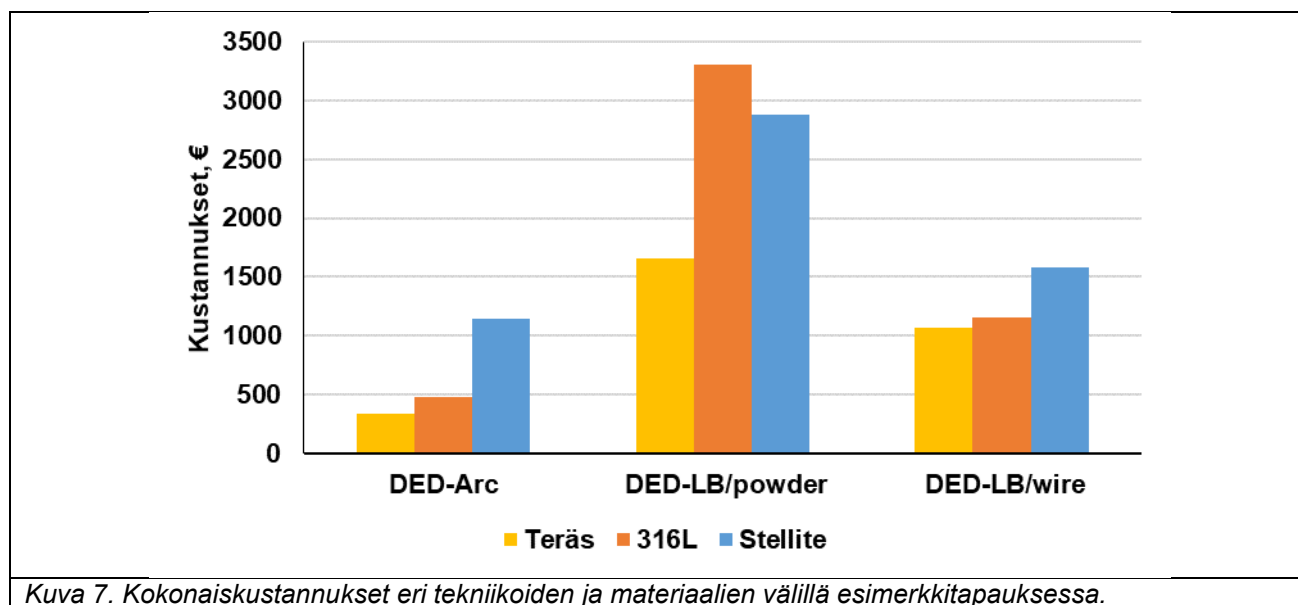


Kuvassa 6 esitetyssä elinkaariarviossa on oletettu alkuperäisen tai entistä vastaavaan kuntoon teräksellä korjatun osan eliniän olevan 2 vuotta, ja tämän eliniän kasvavan kaksinkertaiseksi mikäli korjaus suoritetaan Stellitellä. Eron suuruus luonnollisesti vaihtelee todellisen käyttökohteen ja kulutusmekanismien mukaan; anekdotaalisesti oletama kaksinkertaisesta eliniästä Stellitellä on melko konservatiivinen.

Kuten Kuvasta 6 nähdään, tekniikan kokonaisenergiankulutus ja käytetyn lisäaineen energiasaanti näkyy merkittävänä erona teräksen ja Stelliten elinkaarienergiankulutuksessa. Eniten Stelliteen siirtymästä hyötty DED-LB/powder jonka energiankulutus on teräkselläkin korkea, ja Stelliten kannattavuutta esittävä käyrien risteyspiste saavutetaan alle 5 vuodessa. DED-Arc:in tapauksessa energiankulutus Stellitellä kasvaa tarpeeksi voimakkaasti teräkseen verrattuna ettei risteyspistettä pääse syntyymään, vaan kummallakin materiaalilla elinkaaren energiankulutus kasvaa lähes samalla kulmakertoimella. DED-LB/wire-tekniikalla herkkyyys materiaalin energiasaantiin on DED-Arc:in ja DED-LB/powder:in välillä, ja kannattavuuden risteyspiste saavutetaan 10 vuoden kohdalla.

5.2 Kustannukset

Kustannuksia verrattaessa korjaustekniikoiden ja paikoin myös materiaalien väliset erot korostuvat energiankulutustakin enemmän. Kuvassa 7 on esitetty yleisvertailu kustannuslaskelmista kullekin tekniikalle ja materiaalille.



Kuvassa 7 huomiota herättää DED-Arc:in ja DED-LB/powder:in kustannusten korostunut ero. Huomionarvoista on, että Stellite on tässä laskelmassa jopa 316L:ää edullisempi. Tämä johtuu pitkälti 316L:lle löytyneistä prosessiparametreista, joiden tuottavuus on vain neljäsosa Stelliten parametrien tuottavuudesta. Tämä johtuu pitkälti siitä, että Stellite-prosessi on suunniteltu ja optimoitu pinnoituskäyttöön, kun taas 316L:ää käytetään pitkälti 3D-geometrioiden rakentamiseen, jolloin etenkin monimutkaisten tai tarkkojen osien tapauksessa pinnoituspaan liikenopeus ja samalla jauheen syöttönopeus ovat keskimäärin matalammat.

Lanka on lisäaineena huomattavasti jauhetta edullisempaa, etenkin matalaseosteisen teräksen tapauksessa. Lisäksi teräs on muita vaihtoehtoja helpompaa koneistaa. Tämä on etenkin DED-Arc:ille edukasta, sillä suurikin ylimitasta aiheutuva materiaalihukka ei tuo merkittäviä lisäkustannuksia, kuten Kuvasta 8 käy ilmi.

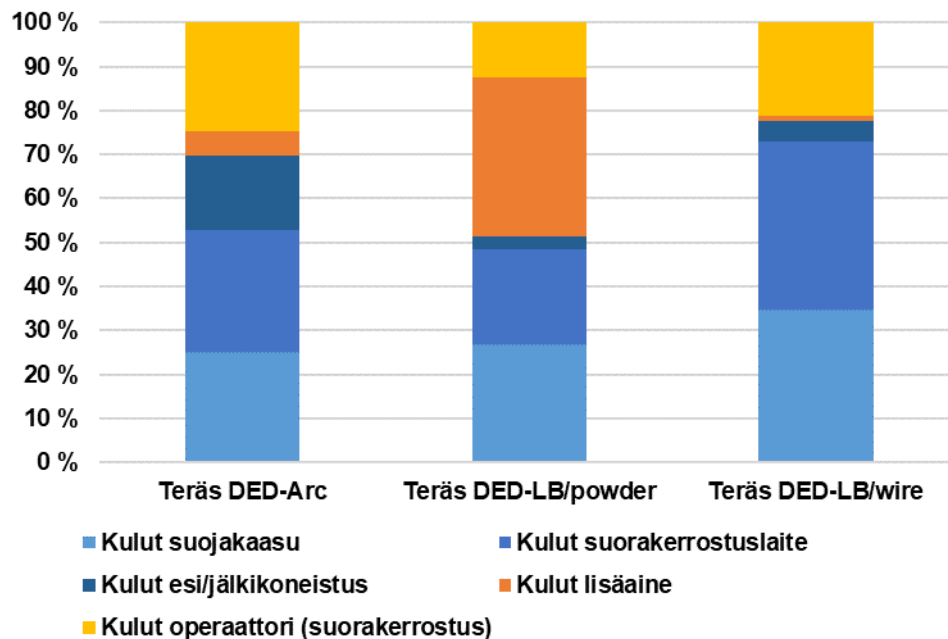


Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

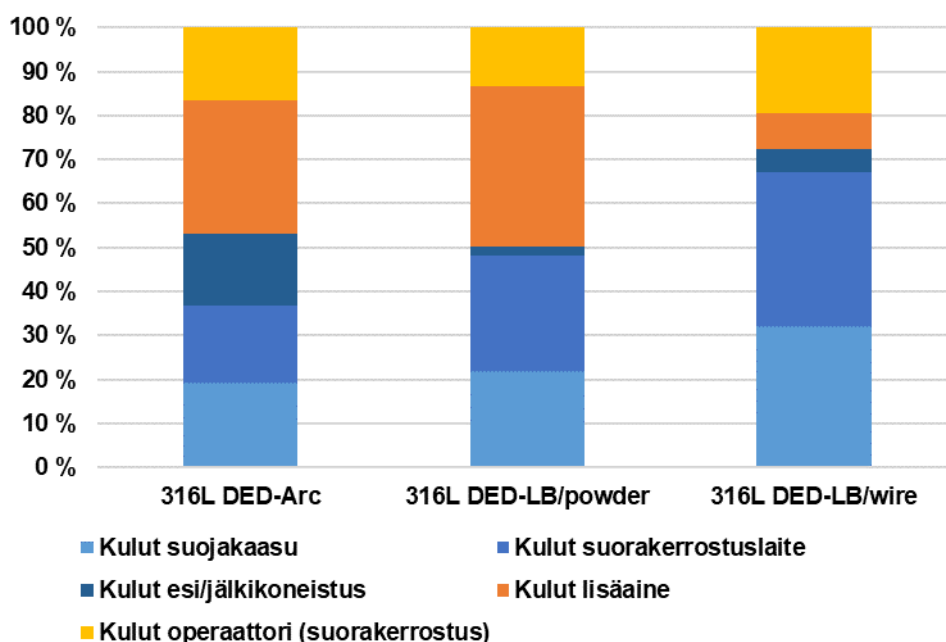
Korjauksen kustannukset, teräs



Kuva 8. Teräksellä suoritettujen korjauksien kustannusten jakauma eri tekniikoille esimerkkitapauksessa.

Verrattuna energiankulutukseen, kustannukset etenkin teräksen tapauksessa eivät ole kovin herkkiä lisäaineen käytölle. Kuten Kuvasta 8 nähdään, lankaa käyttäville tekniikoille materiaalikustannus on marginaalinen verrattuna etenkin suojakaasuun, koneaikaan, ja operaattorin työaikaan. Jopa koneistuksen kustannukset (huom. Sisältäen operaattorin kustannukset) näkyvät merkittävänä siivuna kokonaiskustannuksista, tosin johtuen lähinnä kokonaiskustannusten mataluudesta.

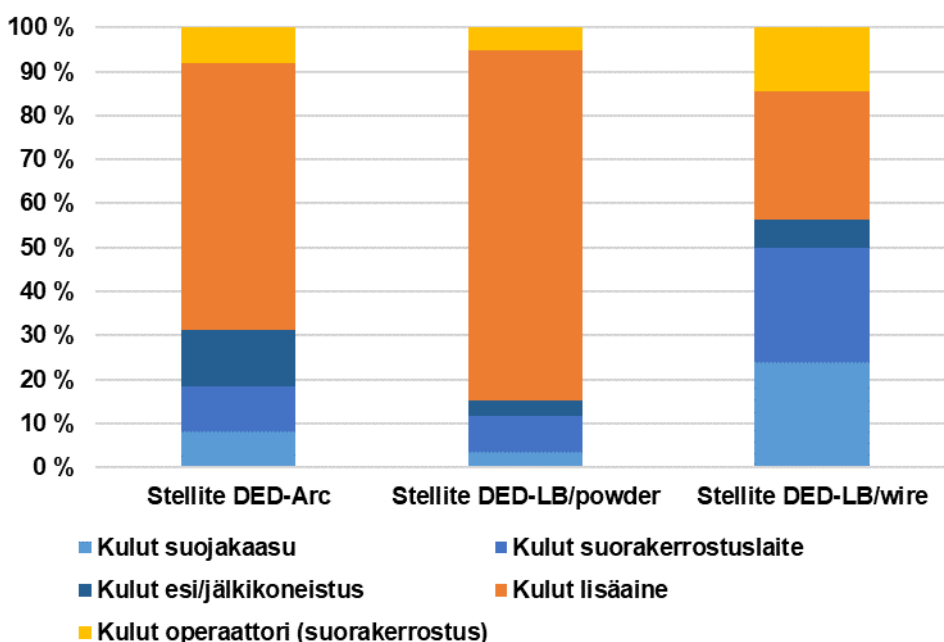
Korjauksen kustannukset, 316L



Kuva 9. Ruostumattomalla teräksellä suoritettujen korjauksien kustannusten jakauma eri tekniikoille esimerkkitapauksessa.

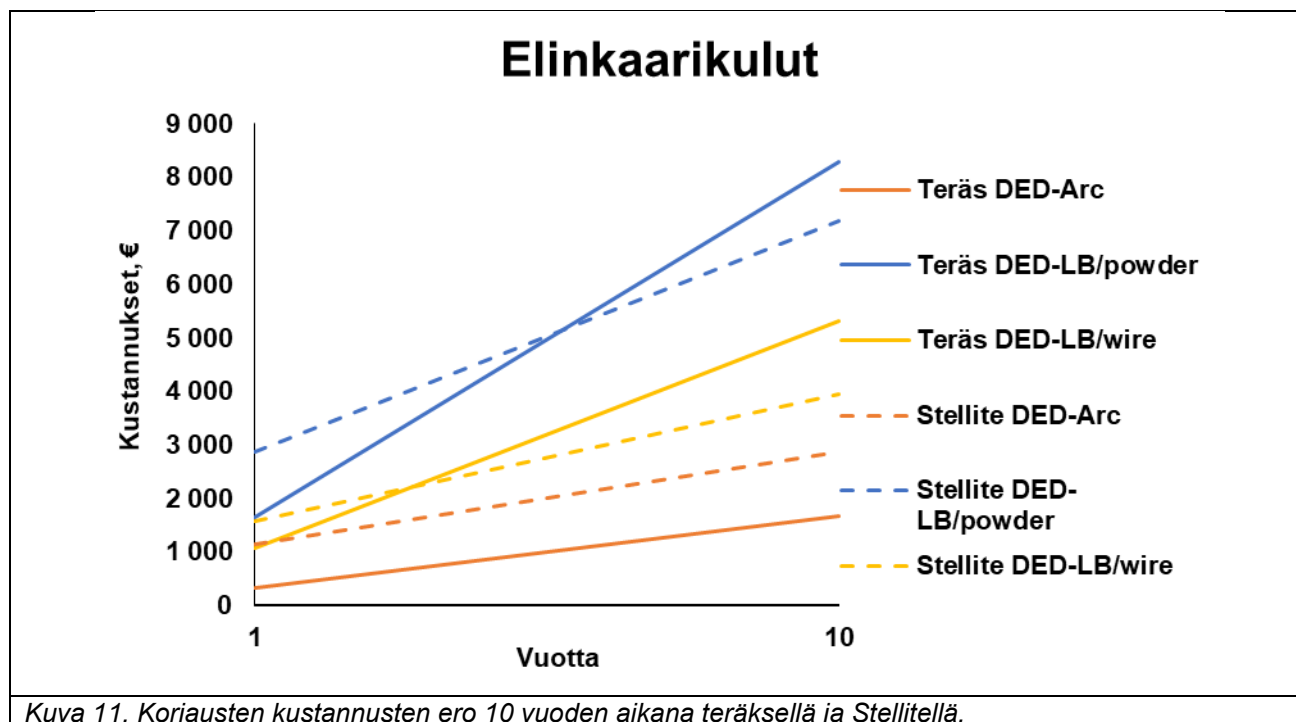
Ruostumaton teräslanka on merkittävästi matalaseosteista terästä kalliimpaa, joka näkyy Kuvassa 9 kasvavina materiaalikustannuksina, etenkin DED-Arc:illa. DED-LB/powder -tekniikalle taas kustannusrakenne on lähes sama kuin teräkselle; 316L on erittäin yleinen ja laajasti saatavilla oleva materiaali jauhepohjaisissa prosesseissa, jolloin jauheen ja langan hintaero on kapeampi kuin lankaprosessien tapauksessa.

Korjauksen kustannukset, Stellite



Kuva 10. Stellitellä suoritettujen korjauksien kustannusten jakauma eri tekniikoille esimerkkitapauksessa.

Stelliteä käyttäessä lisäaineen osuus kustannuksista kasvaa ja erot langan ja jauheen välillä kapenevat, mikä näkyy selvästi Kuvassa 10 lisäaine-palkin koon kasvuna. DED-LB/powder -tekniikalla lisäaine on jo ylivoimaisesti hallitseva kustannus, kun taas DED-LB/wire -tekniikalla koneaika ja suojaakaasu muodostavat yhä noin vastaavan osuuden kustannuksista. DED-Arc menetelmällä huolimatta lisäaineen osuuden kasvusta, koneistus muodostaa yhä merkittävän osan kustannuksista, johtuen Stelliteen koneistuksen hankaluudesta. Koneistusta hankaloittavat ominaisuudet tekevät osaltaan toisaalta Stelliteestä kulutusta kestävästä materiaalista, joka näkyy elinkaarikustannuksissa Kuvassa 11.



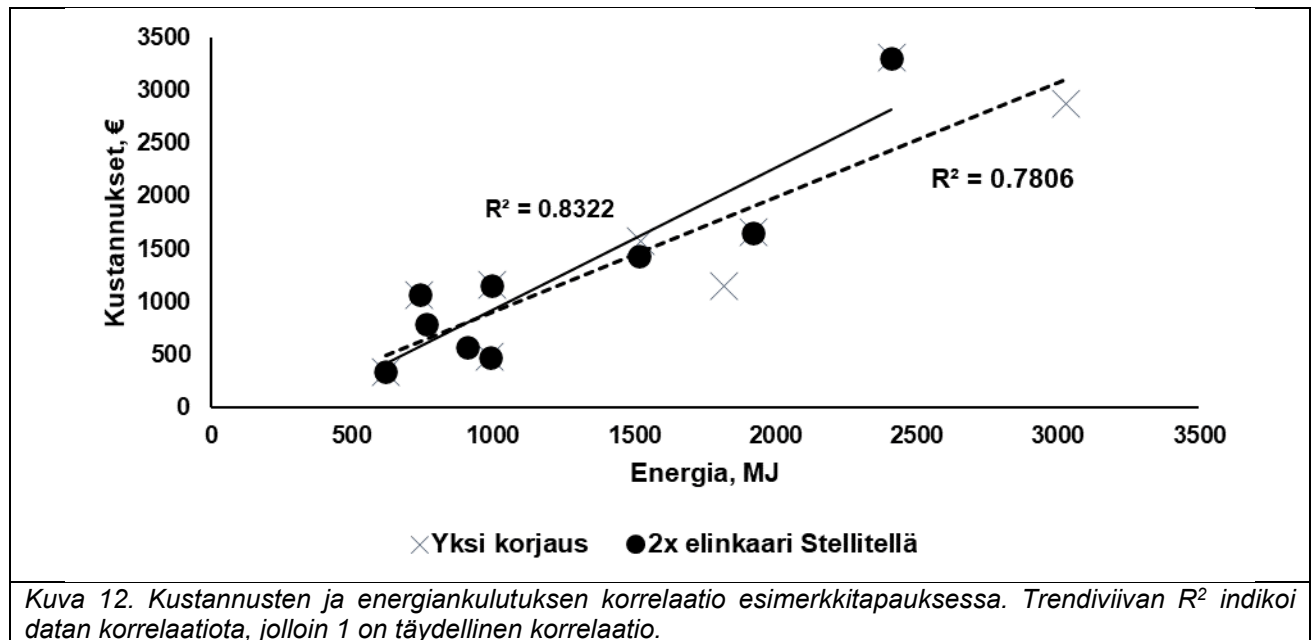
Elinkaaren kustannukset Kuvassa 11 ovat laskettu samoilla olettamilla kuin elinkaaren energiankulutus Kuvassa 6, ja samanlaisia trendejä onkin havaittavissa. DED-Arc:in kustannusten kasvu Stelliteä käyttäessä on riittävän suurta, ettei hyötyä vähentyneistä korjauskerroista pääse syntymään. DED-LB/powder -tekniikan kustannusten risteyskohta on noin viiden vuoden kohdalla. Mielenkiintoista on, että näissä tapauksissa kustannukset ja ympäristövaikutukset skaalautuvat käsi kädessä; teräksen ja Stelliten risteäminen tai risteämättömyys kustannuksissa ja energiankulutuksessa muistuttaa vahvasti toisiaan. Tilanne on toisin DED-LB/wire -tekniikan tapauksessa; Stelliten kustannukset alittavat teräksen jo alle viidessä vuodessa, mikä on selvästi alle puolet energiankulutuksen ”takaisinmaksuajasta”. Tällä tekniikalla kustannukset ja ympäristövaikutukset vaikuttavat siis korreloivan heikommin kuin muilla menetelmillä. DED-LB/wire-prosessi painottaa verrattaen paljon virtoja joilla on merkittävät kustannukset, mutta joiden merkitys ympäristövaikutuksiin on pieni; esimerkiksi operaattorin tai koneen aika.

6. Tulosten tulkinta

Elinkaarilaskennan tulokset, eli energiankulutus tai kustannukset yksinään, eivät anna kokonaiskuvaa tai ymmärrystä korjauksen vaikutusten käyttäytymisestä tai trendeistä. Ne eivät myöskään kerro mitään laskennan oikeellisuudesta, tai sen tulosten suuruusluokasta verrattuna muiden lähteiden perusteella tehtyihin laskelmiin. Näitä näkökulmia käsitellään tässä kappaleessa vertaamalla eri skenaarioita, etsimällä trendejä, ja suhteuttamalla tuloksia saatavilla olevaan DED-tekniikoiden elinkaarilaskentadataan.

6.1 Trendit ja kannattavuus

Päätöksenteon ja intuition kehittämisen kannalta kiinnostavia ovat eri vaikutusten korrelaatiot ja trendit. Myöskin kannattavuutta arvioitaessa on tarpeen tietää, miten kustannukset tai ympäristövaikutukset skaalautuvat esimerkiksi kuluman suuruuden suhteen. Oman liiketoiminnan ympäristövaikutuksia pienentäviä toimia suunniteltaessa on myös kiinnostavaa tietää, joudutaanko ympäristön nimissä uhraamaan taloudellista kannattavuutta. Tätä ymmärtääksemme Kuvassa 12 esitetään kustannusten ja ympäristövaikutusten korrelaatio.



Energiankulutuksella mitattuna ympäristövaikutuksilla ja korjauksen kustannuksilla on selkeä trendi, kuten Kuvasta 12 käy ilmi. Korrelaatiokerroin R^2 esimerkkitapausten



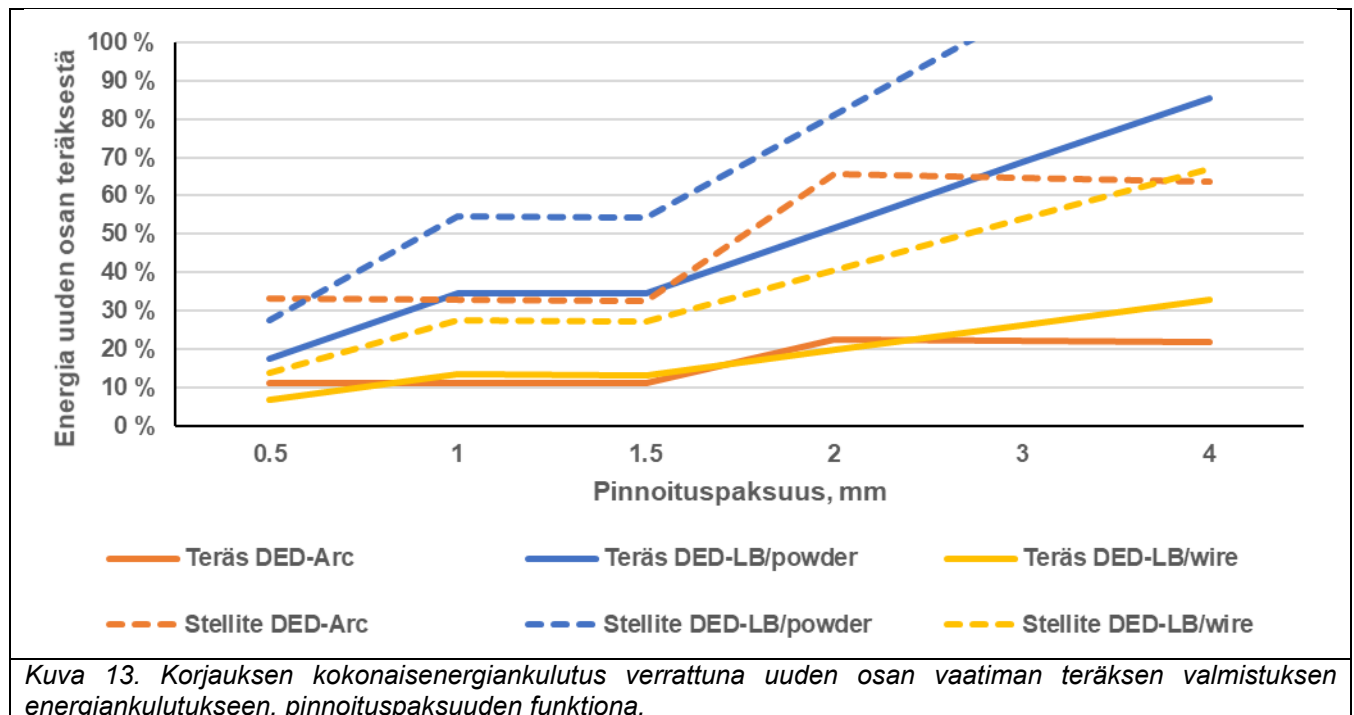
**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

datapisteille on 0.78-0.83 joka indikoi hyvää korrelaatiota energian ja kustannusten välille riippumatta siitä, huomioidaanko elinkaari vaikutukset vai ei. Voidaan siis päätellä, että keskimäärin edullisempi korjaus on myös ympäristövaikutuksiltaan matalampi, ja korjauspäätöksen tekemisen ei tarvitse olla valinta ympäristöarvojen ja kustannusten välillä.

Toisaalta vaihtoehto korjaukselle on usein uuden osan hankinta, jolloin lisäkysymys ympäristöystävällisintä valintaa tehtäessä on, miten korjaaminen vertautuu uuteen osaan? Kuvassa 13 nähdään usealla eri pinnoituspaksuudelle laskettu energiankulutus teräksellä ja Stelliteä korjatuille osille. Energiankulutus on esitetty prosenttilukuna uuden osan vaatiman teräksen tuottamiseen kuluvasta energiasta.



Kuvasta 13 käy selville, että korjauksen vaatima energia on lähes kaikissa tapauksissa pienempi verrattuna uuteen teräsosaan, huomioimatta esim. mittaan koneistusta tai erinäisten piirteiden valmistusta. Vertaus edustaa siis todellisuutta konservatiivisempaa arviota uuden osan ympäristövaikutuksista. Yllättäen jopa Stelliteä käyttäessä suurilla pinnoituspaksuuksilla korjaus on ympäristöystävällisin vaihtoehto, poislukien DED-LB/powder tekniikan yli 2 mm pinnoituspaksuuksilla.

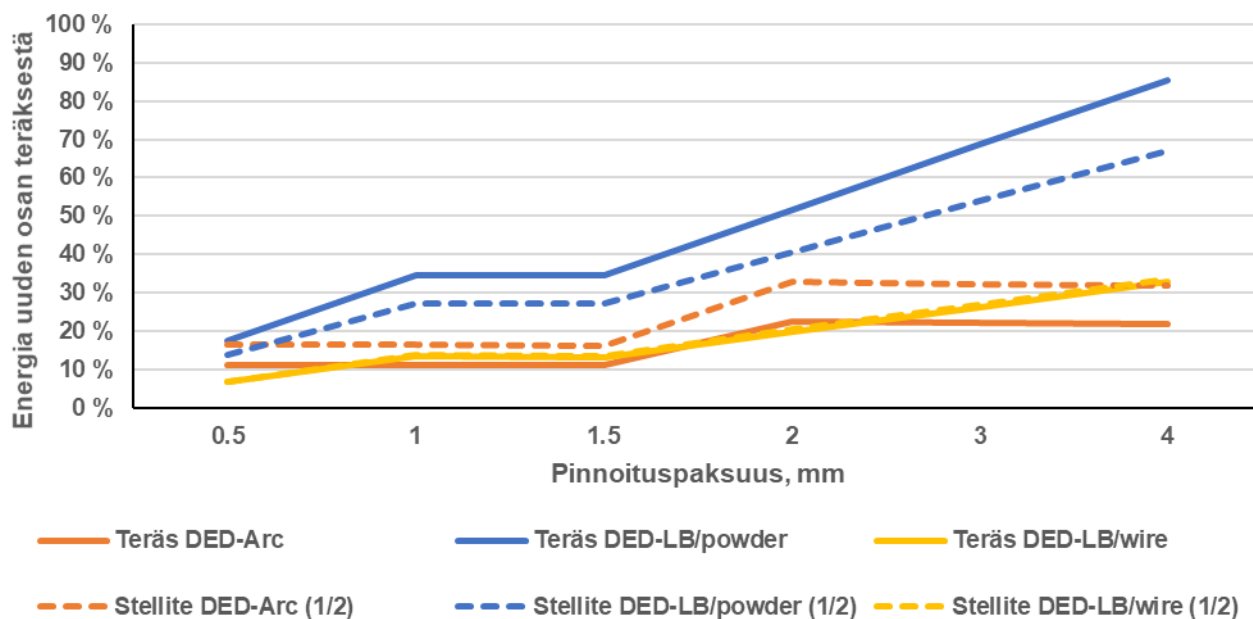
On kuitenkin huomioitava, että Stelliteä saavutetaan todennäköisesti ainakin kaksinkertainen käyttöikä verrattuna teräksestä valmistettuun tai teräksellä korjattuun osaan. Tämä on otettu huomioon Kuvan 14 vertauksessa.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



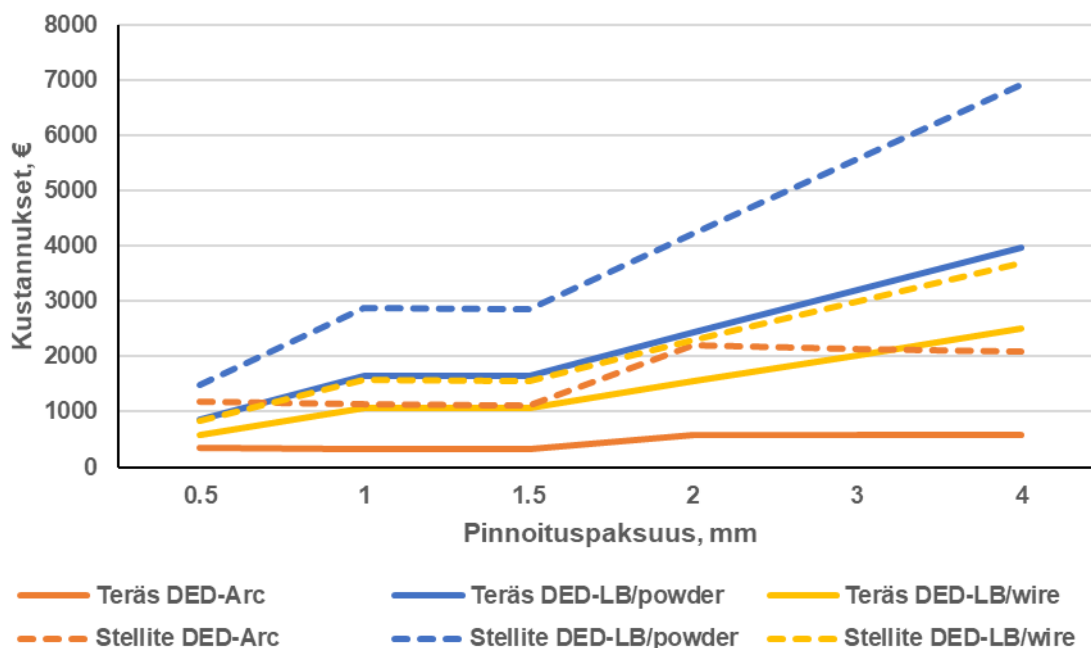
**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**



Kuva 14. Korjauksen kokonaisenergiankulutus, huomioiden elinkaarivaikutukset, verrattuna uuden osan vaatiman teräksen valmistuksen energiankulutukseen, pinnoituspaksuuden funktiona.

Kuten Kuvasta 14 nähdään, kun elinkaarivaikutukset huomioidaan, Stellite'n käyttö on ympäristönäkökulmasta perusteltua suurillakin pinnoituspaksuuksilla.

Taloudellisen kannattavuuden arviointi yleistasolla on hankalaa, ja vaihtoehtokustannukset korjaukselle ovat aina hyvin tapauksesta riippuvaisia. Kustannusten kasvua pinnoituspaksuuden funktiona tarkastellaan tästä johtuen Kuvassa 15 absoluuttisen euromäärän kautta.



Kuva 15. Kustannusten vaihtelu pinnoituspaksuuden funktiona.

Kuten Kuvasta 15 nähdään, pinnoituspaksuuden vaikutus kustannuksiin seuraa samoja trendejä kuin ympäristövaikutustenkin. Käyrien porrasmaisuus selittyy sillä, että laskennassa huomioidaan kerrospaksuus; mikäli kerrospaksuus on merkittävästi suurempi kuin tarvittu pinnoituspaksuus, yksi kerros todennäköisesti riittää kattamaan myös ”koneistusvaran” eli vaaditun ylimitan jotta epätasaisen suorakerrostetun pinnan matalin ”laakso” ei jää jälkikoneistamatta oikeaan mittaan. Kun vaadittu pinnoituspaksuus ja vaadittu ylimitta yhdessä ylittää tietyn rajan, tässä laskelmassa oletus on puolet kerrospaksuudesta, tarvitaan toinen kerros, joka kaksinkertaistaa prosessiin kuluva ajan ja materiaalin. Käyrän porrasmaisuus korostuu DED-Arc -tekniikalla, johtuen prosessin korkeasta kerrospaksuudesta. Tällöin yhdellä kerroksella voidaan kattaa pinnoituspaksuus ja vaadittu ylimitta 1.5 mm asti, eivätkä menetelmän kustannukset tai ympäristövaikutukset juurikaan muutu tällä välillä. DED-LB/powder -tekniikalla taas kerrospaksuus on matala, ja esimerkiksi saman 1.5 mm pinnoituspaksuuden kattaminen vaatii kaksi kerrosta. Tällöin pinnoituspaksuuden ja kustannusten (tai ympäristövaikutusten) kasvu on enemmän lineaarista kuin portaittaista.

Johtopäätöksenä mikäli osan korjausväliä voi säätää, ts. kuluman voi turvallisesti antaa kasvaa joitain millemä, tai DED-laitteiston kerrospaksuutta voidaan säätää tietyn laatuikkunan puitteissa, voi korjauskustannuksissa säästää pitkällä aikavälillä moninkertaisesti kun kuluman määrä ja/tai kerrospaksuus optimoidaan toistensa suhteen. Tässä laskelmassa käytetyt kerrospaksuudet ovat tyyppillisten arvojen perusteella tehtyjä arvioita, eivätkä

välttämättä vastaa tarkasti minkään palveluntarjoajan tai laitevalmistajan prosessia. Kerrospaksuuden kasvattaminen ei toki ole yksiselitteistä, ja vaati merkittävästi iterointia. Esimerkiksi lämmöntuonti saattaa kasvaa, tai mikäli palkojen väliä kasvatetaan samassa suhteessa, kerrostusprosessin palkojen ”laaksojen” ja ”huippujen” välinen vaihtelu kasvaa, mikä voi myös lisätä vaaditun jalkikoneistuksen määrää.

6.2 Tulosten oikeellisuus

Elinkaariarvioiden tulosten oikeellisuuden varmistaminen on usein haastavaa, etenkin kun kyseessä on prosessi joka on erittäin tapauskohtainen. Yhden tietyn tapauksen kautta absoluuttisten arvojen validointi on siis vaikeaa mutta myös ongelmallista, sillä on todennäköistä että tällöin malli kalibroidaan vastaamaan tapausta joka ei toistu laskentatyökalun käytössä, eikä anna vertailukelpoisia tuloksia todellisessa käytössä.

Tätä epävarmuutta havainnollistaa Taulukko 10, jossa esitetään vertaus tieteellisessä kirjallisuudessa julkaistuille DED-prosessin energiankulutuslukemille normalisoituna massan mukaan.

Taulukko 10. DED-tekniikoille tehtyjä LCA-laskelmia kirjallisuudesta, sekä tämän julkaisun esimerkkitapaus.

Tekniikka	Materiaali	Haluttu aineen lisäys, kg	Kulunut energia, MJ	MJ/kg	Raportoitu kgCO ₂ eq / kg	Lähde
DED-Arc	Ti64	0.28	130	464	29	Priarone, 2017
DED-Arc	Ti64	0.20	110	550	33	Priarone, 2017
DED-Arc	Ti64	0.06	50	833	42	Priarone, 2017
DED-Arc	Teräs	0.20	59.0	289	8	Kokare, 2023
DED-Arc	Teräs	0.04	114	2780	32	Priarone, 2020
DED-Arc	Teräs	1.47	620	419	-	Tämä julkaisu
DED-LB/powder	Teräs	1.47	1920	1300	-	Tämä julkaisu
DED-LB/wire	Teräs	1.47	739	500	-	Tämä julkaisu

Kuten Taulukosta 10 nähdään, DED-tekniikoiden LCA-laskenta etenkin energiankulutuksen ja muiden kuin DED-Arc menetelmän osalta puuttuu pitkälti kirjallisuudesta. Löydetyt tapaukset tutkivat tyypillisesti myös erittäin pieniä, laboratorio-oloihin soveltuvia kappaleita, jolloin herkkyys esimerkiksi prosessiin liittyville virroille ja olettamille kasvaa merkittävästi. Tämä näkyy massan suhteen normalisoidussa energiankulutuksessa, joka vaihtelee muutamasta sadasta muutamaan tuhanteen. Verrattuna kirjallisuuteen, tämän julkaisun esimerkkitapauksen energiankulutus on mittakaavaerostaan huolimatta massalla normalisoituna oikeassa suuruusluokassa.

LCC:lle eli kustannusten elinkaariarvioinnille löydettyjä lähteitä esitellään Taulukossa 11. Huomionarvoista on, että kuten Kappaleessa 2 todettiin, laskennan tulokset ovat myös



ajasta sekä maantieteestä riippuvia, mm. inflaation ja paikallisesti elävän hintatason vuoksi. Tämä tekee kustannusarvioiden pistemäisestä validoinnista vieläkin vaarallisempaa.

Taulukko 11. DED-teknikoille tehtyjä LCC-laskelmia kirjallisuudesta, sekä tämän julkaisun esimerkkitaupaus.

Tekniikka	Materiaali	Haluttu aineen lisäys, kg	Työstöaika, h	Kustannukset, €	€/kg	€/h	Lähde
DED-Arc	Teräs	10.63			60-100	60-75	Fagerström 2025
DED-LB/wire	Ti64	0.29	1.65	345	1190	209	Porevapoulos 2024
DED-LB/wire	Ti64	1.66	9.41	1260	759	134	Porevapoulos 2024
DED-LB/wire	316l	0.51	1.65	327	641	198	Porevapoulos 2024
DED-LB/wire	316l	2.91	9.41	1155	397	123	Porevapoulos 2024
DED-Arc	Alumiini	33.00	15.00	5000	152	333	Priarone 2020
DED-Arc	Teräs	143.00	170.00	25000	175	147	Priarone 2020
DED-Arc	Ti64	12.20	25.00	6000	492	240	Priarone 2020
DED-LB/powder	Teräs	0.04	0.09	22	584	245	Gouveia 2022
DED-Arc	Teräs	1.47	3.52	337	228	96	Tämä julkaisu
DED-LB/powder	Teräs	1.47	13.51	1657	1122	123	Tämä julkaisu
DED-LB/wire	Teräs	1.47	15.21	1065	721	70	Tämä julkaisu

Kuten Taulukosta 11 käy ilmi, vaihtelu on erittäin suurta myös LCC-laskennan kirjallisuudessa. Tutkimuksen määrä on yhä pieni, tosin etuna LCA:han verrattuna on että LCC-laskentaa on tehty myös suuremmille kappaleille, joka voisi viitata teollisuuden mielenkiintoon kustannuslaskentaa kohtaan, verrattuna ympäristövaikutuksiin. Tämän esimerkkitaupauksen massan tai työstöajan suhteen normalisoidut arvot ovat kirjallisuutta vastaavaa suuruusluokkaa, mutta suuresta vaihteluvälistä johtuen johtopäätöksiä on hankala vetää. DED-LB/powder tekniikan hinta etenkin massan suhteen normalisoituna näyttää korkealta verrattuna kirjallisuuteen, tosin johtuen vertailukelpoisten datapisteiden puutteesta. Ajan suhteen normalisoidut kustannukset ovat selvästi kirjallisuuteen verraten alimmasta päästä, vaikka hinta per massa onkin melko keskivertoa.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

7. Johtopäätökset

Suorakerrostuksella, eli erinäisillä DED-tekniikoilla tehdyt korjaukset ovat poikkeuksetta yksittäistapauksia. Yhden tapauksen perusteella on vaikea ekstrapoloida kustannuksia tai ympäristövaikutuksia toiseen tapaukseen. Yrityksen sisällä tätä on mahdollista tehdä kokempohjaisesti, mutta varsinkin tekniikkaan perehtymättömälle, oman laitteiston hankintaa tai palveluntarjoajaa harkitsevalle on arvokasta voida arvioida kustannusten tai ympäristövaikutusten suuruusluokkia ja vertailla eri tekniikkoja ja materiaaleja keskenään. Tätä varten Metallituotteen Uusi Elämä -hankkeessa on luotu elinkaarilaskentatyökalu. Tässä julkaisussa työkalua sovellettiin tyypilliseen korjattavaan esimerkkitapaukseen.

Tuloksena saadut energiankulutus ja kustannukset paljastivat, että korjaus on ympäristönäkökulmasta käytännössä aina kannattavaa verrattuna uuden osan valmistukseen. Alkuperäistä korkeamman suorituskyvyn materiaalin käyttö korjauksessa on lähes poikkeuksetta yhden korjauksen kohdalla ympäristövaikutuksiltaan ja kustannuksiltaan suurempi, mutta jos tuotteen pidentynyt elinkaari huomioidaan, suurimmassa osassa tapauksia kalliimpi materiaali maksaa itsensä takaisin niin kustannuksien kuin ympäristövaikutuksenkin osalta. Eri tekniikoilla on merkittävän erilainen kustannusrakenne, ja niiden erot tarkkuudessa ja kerrokorkeudessa tulee huomioida osakohtaisesti, ja ideaalisesti jo osan vaihtoväliä suunniteltaessa.

Verrattuna olemassaolevaan kirjallisuuteen DED-tekniikoiden elinkaarilaskennasta, esimerkkitapaus ja laskentatyökalu tuottaa keskimäärin vaihteluväliin sopivia tuloksia. Ongelmallista on saatavilla olevan kirjallisuuden vähyys ja sen sisäinen vaihteluväli. Toisaalta kirjallisuuden hajonta havainnollistaa pistemäisen, yksittäiseen case-tapaukseen nojaavan validaation vaarallisuuden DED-tekniikoiden elinkaariarvioissa. Prosessiparametrien vaikutus tuottavuuteen ja materiaalihukkaan on merkittävä, jotka ovat vaikutusvaltaisimmat virrat ympäristövaikutuksille ja kustannuksille. Parametrit taas riippuvat vahvasti niin käytössä olevasta laitteesta kuin korjaustapauksesta; ja johtuen korjaamisen luonteesta, jokainen tapaus on pitkälti yksilöllinen. Laskentatyökalu muodostaa siis erinomaisen pohjan suurpiirteiselle vertailulle, ja mikäli todelliset parametrit ovat tiedossa, suhteellisen tarkallekin yksilöidylle LCA/LCC-laskennalle.



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 37(39)
--	---	--	------------------------

Lähteet

Ascari, A., Lutey, A. H. A., Liverani, E., & Fortunato, A. (2020). Laser Directed Energy Deposition of Bulk 316L Stainless Steel. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 7(4), 426–448. <https://doi.org/10.1007/s40516-020-00128-w>

Bernauer, C., Sigl, M. E., Grabmann, S., Merk, T., Zapata, A., & Zaeh, M. F. (2024). Effects of the thermal history on the microstructural and the mechanical properties of stainless steel 316L parts produced by wire-based laser metal deposition. *Materials Science and Engineering: A*, 889, 145862. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145862>

Dopler, M., & Weiß, C. (2021). Energy Consumption in Metal Powder Production. *BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte*, 166(1), 2–8. <https://doi.org/10.1007/s00501-020-01068-w>

Ehmsen, S., Conrads, J., Klar, M., & Aurich, J. C. (2025). Environmental impact of powder production for additive manufacturing: Carbon footprint and cumulative energy demand of gas atomization. *Journal of Manufacturing Systems*, 82, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.05.004>

Fagerström, M. (2025). IMPLEMENTING WAAM INTO WELDING AUTOMATION AND COMPARING IT WITH TRADITIONAL MANUFACTURING METHODS.

Feix, T., & Hache, E. (2025). Cumulative Energy Demand and Global Warming Potential of metals and minerals production: Assessment, projections and mitigation options. *Resources Policy*, 102, 105516. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105516>

Fingrid. (2025). Sähkötuotannon ja -kulutuksen CO2-päästöarviot. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/co2/>

Gouveia, J. R., Pinto, S. M., Campos, S., Matos, J. R., Sobral, J., Esteves, S., & Oliveira, L. (2022). Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Additive Manufacturing Repair Processes in the Mold Industry. *Sustainability*, 14(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su14042105>

Hasan, M. S., Mazid, A. M., & Clegg, R. (2016). The Basics of Stellites in Machining Perspective. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 1(2), 35–50. <https://doi.org/10.26776/ijemm.01.02.2016.01>

Hörkkö, J. (2025). Life Cycle Assessment of Metal Part Repair Using Directed Energy Deposition: A Comparison Between Arc- and Laser-Based Methods [Turun yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2025061065137>



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 38(39)
--	---	--	------------------------

Kara, S., & Li, W. (2011). Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals*, 60(1), 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.018>

Kiehl, M., Scheid, A., Graf, K., Ernst, B., & Tetzlaff, U. (2023). Coaxial Laser Cladding of Cobalt-Base Alloy Stellite™ 6 on Grey Cast Iron Analysis of the Microstructural and Mechanical Properties Depending on the Laser Power. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(8), 3821–3838. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07358-3>

Kokare, S., Oliveira, J. P., Santos, T. G., & Godina, R. (2023). Environmental and economic assessment of a steel wall fabricated by wire-based directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 61, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103316>

Koti, D., Powell, J., Naesstroem, H., & Voisey, K. (2023). Powder catchment efficiency in laser cladding (directed energy deposition). An investigation into standard laser cladding and the ABA cladding technique. *Journal of Laser Applications*, 35, 12025. <https://doi.org/10.2351/7.0000904>

Krolczyk, G. M., Nieslony, P., & Legutko, S. (2015). Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(2), 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.05.001>

Lin, Z., Ya, W., Subramanian, V. V., Goulas, C., di Castri, B., Hermans, M. J. M., & Pathiraj, B. (2020). Deposition of Stellite 6 alloy on steel substrates using wire and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(1), 411–426. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06116-w>

Lipiäinen, K., Afkhami, S., Lund, H., Ahola, A., Varis, S., Skriko, T., & Björk, T. (2024). Manufacturing and mechanical performance of a large-scale stainless steel vessel fabricated by wire-arc direct energy deposition. *Materials & Design*, 243, 113044. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113044>

Porevopoulos, N., Tzimanis, K., Souflas, T., Bikas, H., Panagiotopoulou, V. C., & Stavropoulos, P. (2024). Decision support for repair with DED AM processes based on sustainability and techno-economical evaluation. *Procedia CIRP*, 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024 (CMS 2024), 130, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.048>

Priarone, P. C., Ingarao, G., di Lorenzo, R., & Settineri, L. (2017). Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S191–S202. <https://doi.org/10.1111/jiec.12523>

Priarone, P. C., Pagone, E., Martina, F., Catalano, A. R., & Settineri, L. (2020). Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing. *CIRP Annals*, 69(1), 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.010>



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / raportti	Sivu 39(39)
---	---	--	------------------------

Queguineur, A., Daareyni, A., Mokhtarian, H., Isakov, M., Rook, R., Ya, W., Goulas, C., Hascoët, J.-Y., & Ituarte, I. F. (2025). Digital design and manufacturing of a railway bogie demonstrator via multi-material wire arc directed energy deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136(11), 5281–5303. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15132-7>

Rinne, M., Elomaa, H., & Lundström, M. (2021). Life cycle assessment and process simulation of prospective battery-grade cobalt sulfate production from Co-Au ores in Finland. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2127–2142. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01965-3>

Van der Voet, E., Van Oers, L., Verboon, M., & Kuipers, K. (2019). Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals: Methodology and Application to the Case of Seven Major Metals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 141–155. <https://doi.org/10.1111/jiec.12722>

Velchev, S., Kolev, I., Ivanov, K., & Gechevski, S. (2014). Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning. *Journal of Cleaner Production*, 80, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.099>

Wei, W., Samuelsson, P. B., Jönsson, P. G., Gyllenram, R., & Glaser, B. (2023). Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of High-Carbon Ferrochrome Production. *JOM*, 75(4), 1206–1220. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05707-8>



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**