

Elias Jerkku

# HITSAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS KÄSILASERHITSIN LAATUUN

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Joulukuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Elias Jerkku: Hitsausparametrien vaikutus käsilaserhitsin laatuun  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaatintutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2025

---

Käsilaserhitsaus on sulahitsausmenetelmä, joka on vasta viime vuosina yleistynyt hitsausprosessi. Menetelmän suuri hitsausnopeus, pieni lämmöntuonti ja nopeasti omaksuttava suoritustekniikka ovat selkeitä etuja perinteisiin kaarihitsausmenetelmiin verrattuna. Näistä eduista huolimatta käsilaserhitsauksen kykyä täyttää vaativat laatuvaatimukset ei ole vielä laajasti tutkittu. Käsilaserhitsausta voidaan pitää nopeasti yleistyvänä, mutta vielä vähän tutkittuna hitsausprosessina. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan käsilaserhitsausprosessin ominaisuuksia sekä haasteita, jotka tulee ottaa huomioon prosessin hitsausparametrejä valittaessa.

Työn tutkimuskysymyksiksi valikoituivat: ”Mitkä ovat käsilaserhitsauksen merkittävimmät hitsin laatuun vaikuttavat haasteet?” sekä ”Miten käsilaserhitsauksen hitsausparametrit vaikuttavat hitsin laatuun?”

Tutkielma toteutetaan kuvailevana kirjallisuuskatsauksena, jossa kootaan ja yhdistetään aiempaa tutkimustietoa, kuten vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleja, hitsausalan instituution IIW-konferenssin tiedostoja, standardeja, kirjallisuutta, kaupallisten yritysten prosessikuvauksia, hitsauslaittevalmistaja Kempin oppimateriaaleja sekä Hitsaustekniikka-lehden artikkeleja. Työ ei sisällä käsilaserhitsauslaitteiston yksityiskohtaista teknistä tarkastelua eikä hitsaustyön turvallisuuskäsitteitä.

Tutkimuksen tuloksena määritettiin käsilaserhitsauksen oleelliset haasteet hitsausparametrien valinnan näkökulmasta. Käsilaserhitsaus perustuu avaimenreikähitsaukseen, jossa lasersäde sulattaa ja höyryttää metallia suurella energiaintensiteetillä muodostaen kappaleen pintaan avaimenreikää muistuttavan aukon. Sekä hitsausprosessin edut, että haasteet voidaan nähdä kulminoituvan avaimenreiän ominaisuuksiin. Avaimenreiän avulla lasersäde pääsee tunkeutumaan syvälle materiaaliin mahdollistaen tarkan lämpöenergian kohdistamisen. Haasteita tuo menetelmän toistettavuus, huokoisuus, suuret jäähtymisnopeudet, puhtaus sekä hitsattavan liitoksen ilmaraon vaihtelut.

Käsilaserhitsauksen hitsausparametrien valinnassa tulee pyrkiä avaimenreiän vakauteen, riittävän tunkeuman saavuttamiseen sekä hitsattavien kappaleiden ilmarakojen huomioimiseen. Tulosten perusteella epävakaseen avaimenreikään vaikuttaa suoritustekniikka, lasertehon ja kuljetusnopeuden suhde, suojakaasun tyyppi ja virtausnopeus, vaaputuksen parametrit sekä liitoksen ilmaraon vaihtelut. Epävakaa avaimenreikä aiheuttaa metalliroiskeita, tunkeuman vaihtelua ja huokoisuutta, minkä vuoksi hitsausparametrejä valittaessa on varmistettava avaimenreiän tasapainoinen käyttäytyminen.

Kirjallisuuskatsauksessa on hyödynnetty sekä käsilaserhitsausta että mekanisoitua laserhitsausta käsitteleviä lähteitä. Menetelmien keskeinen ero on siinä, että käsilaserhitsauksessa hitsauspoltinta liikutetaan manuaalisesti, kun taas mekanisoidussa laserhitsauksessa liike on automatisoitu, vakaa ja paremmin toistettavissa. Käsilaserhitsauksen toistaiseksi saatavilla olevan tutkimustiedon vähäisyys tekee molempien prosessityyppien lähteiden käytön tarpeelliseksi. Tutkimusten tuloksia voidaan pitää kokonaisuudessaan luotettavina, joskin lisätutkimusta juuri käsilaserhitsauksen sovelluksiin tarvitaan lisää. Empiiristä lisätutkimusta tarvittaisiin laajemmin eri materiaaleille, liitostyypeille sekä siihen kuinka avaimenreiän epävakautta voitaisiin vähentää juuri manuaalisesti suoritettussa käsilaserhitsausprosessissa.

Avainsanat: Käsilaserhitsaus, HLBW, hitsausparametrit

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmanprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

OpenAI, ChatGPT  
NotebookLM

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: [Listaa tähän kaikki tekoälysovellukset ja niiden versiot, joita olet käyttänyt tutkielmanprosessin aikana.]

OpenAI, ChatGPT, (Versio GPT-4, kesäkuu-elokuu)  
OpenAI, ChatGPT, (Versio GPT-5, elokuu-joulukuu)  
NotebookLM (syyskuu-joulukuu)

Käyttötarkoitus: [Kuvaa tähän yksityiskohtaisesti, mihin tarkoitukseen ja miten tekoälyä on sovellettu opinnäytteeseen tutkielmanprosessin aikana.]

Tekoälyä on hyödynnetty seuraavissa:  
Kuvien uudelleen muokkaamisessa  
Vertaisarvioitujen tieteellisten lähteiden etsinnässä  
Lähteiden arvioinnissa  
Kieliasun tarkastamisessa

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: [Luettele tähän kaikki opinnäytteen vaiheet ja osiot, joissa tekoälyä on tutkielmanprosessin aikana käytetty.]

Olen muokannut seuraavat kuvat tekoälyn avulla: 2, 6–8  
Olen löytänyt suuren osan vertaisarvioituista lähteistä tekoälyn avulla (kaikki osiot)  
Olen arvioinut työni kieliasua tekoälyn avulla läpi koko työn.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KÄSILASERHITSAUKSEN PROSESSIKUVAUS .....	3
2.1 Laservalo .....	5
2.2 Hitsattavat liitokset .....	6
2.3 Käsilaserhitsien mikrorakenne ja mekaaniset ominaisuudet .....	7
2.4 Käsilaserhitsauksen laadunhallinnan standardit .....	8
2.5 Käsilaserhitsauksen laadunhallinnan haasteet .....	9
3. KÄSILASERHITSAUKSEN PARAMETRIEN VALINTA .....	14
3.1 Polttopisteen koko, tarkennus ja energian tiheys .....	15
3.2 Lasersäteen vaaputus .....	16
3.3 Suojakaasun ja virtausnopeuden valinta .....	18
3.4 Lisäainelangansyöttö ja suoritustekniikka .....	20
4. TULOSTEN ANALYSOINTI .....	21
4.1 Käsilaserhitsin laatuun vaikuttavat haasteet .....	21
4.2 Hitsausparametrien vaikutus käsilaserhitsin laatuun .....	22
4.3 Tulosten luotettavuus ja jatkotutkimuskohteet .....	25
5. YHTEENVETO .....	27
LÄHTEET .....	29

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>BM</i>	<i>engl. Base Material, perusmateriaali</i>
<i>FZ</i>	<i>engl. Fusion Zone, sulamisvyöhyke</i>
<i>HAZ</i>	<i>engl. Heat Affected Zone, lämpövaikutusalue</i>
<i>HLBW</i>	<i>engl. Handheld Laser Beam Welding, Käsilaserhitsaus</i>
<i>HSS</i>	<i>engl. High Strength Steel, korkealujuusteräs</i>
<i>IIW</i>	<i>engl. International Institute of Welding, Kansainvälinen hitsausalan instituutti</i>
<i>LASER</i>	<i>engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, laservalo</i>
<i>MAG</i>	<i>engl. Metal Active Gas Welding, aktiivikaasukaarihitsaus</i>
<i>TIG</i>	<i>engl. Tungsten Inert Gas-Welding, kaasukaarihitsausprosessi</i>
<i>WPS</i>	<i>engl. Welding Procedure Specification, hitsausohje</i>
<i>M<sup>2</sup></i>	<i>lasersäteen laatua kuvaava parametri</i>
<i>z<sub>f</sub></i>	<i>polttopisteen sijainti suhteessa työkappaleen pintaan</i>

# 1. JOHDANTO

Käsilaserhitsauksella (HLBW, Handheld Laser Beam Welding) tarkoitetaan sulahitsausmenetelmää, jossa metalliset kappaleet yhdistetään lämpöenergian avulla. Kohdistettu lasersäde muodostaa työstettävän kappaleen pintaan sulan metallialtaan (engl. molten pool), minkä seurauksena kappaleet kiinnittyvät jäähtyessään yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Hitsausprosessin keskeisimmät edut perustuvat suureen energiantiheuteen, jonka avulla saavutetaan suuri tunkeuma, korkea hitsausnopeus ja vähäinen materiaaliin kohdistuva kokonaislämmöntuonti. [1] Suomeen käsilaserhitsauslaitteita maahantuovan Ionixin (2024) mukaan käsilaserhitsaus voi olla jopa kymmenen kertaa nopeampaa kuin TIG-hitsaus (engl. Tungsten Inert Gas Welding) [2]. Pfallerin (2024) mukaan pienen lämmöntuonnin ansiosta hitsattavat kappaleet kokevat vähemmän muodonmuutoksia eli vetelyitä [3]. Vetelyiden väheneminen nopeuttaa työntekoa, koska niiden aiheuttamiin jälkityövaiheisiin kuluu siten vähemmän aikaa. Käsilaserhitsauksen etuna on myös se, että se on uusille hitsaajille helpompi omaksua kuin perinteiset kaarihitsausmenetelmät, mikä korostuu osaavien hitsaajien tarpeen kasvaessa Yhdysvalloissa. [3] Sipola (2022) raportoi, että myös Suomessa on pulaa osaavista hitsaajista [4].

Savonia-ammattikorkeakoulun TKI-asiantuntija Jussi Asikainen kirjoitti kesäkuussa 2025 julkaistussa Hitsaus Tekniikka -lehdessä käsilaserhitsauksen tulleen Suomen markkinoille nopeasti. Hänen arvionsa mukaan Suomessa on tällä hetkellä noin kaksisataa käsilaserhitsauslaitetta ja määrän odotetaan kasvavan edelleen. Käsilaserhitsauksen yleistymistä voidaan pitää merkittävänä, sillä se tarjoaa kevyemmän väylän laserhitsauksen etujen hyödyntämiseen verrattuna täysin automatisoituihin ratkaisuihin. Asikainen korostaa, että käsilaserhitsaus poikkeaa liitosmenetelmänä merkittävästi kaarihitsausprosesseista. Käyttöönotto edellyttää testaamista, lainalaisuuksien, haasteiden ja mahdollisuuksien ymmärtämistä. Käsilaserhitsauksen keskeisiksi haasteiksi Asikainen mainitsee huokoisuuden, työstettävien kappaleiden tiukat toleranssivaatimukset sekä hitsisulan hallitsemisen. [5, s. 13]

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tarkastella käsilaserhitsauksen säädettäviä hitsausparametrejä. Käsilaserhitsausparametrien lisäksi työssä kuvataan menetelmälle ominaiset haasteet, joihin hitsausparametrien säätämällä pyritään vaikuttamaan. Tutkimustulosten avulla tarkastellaan, miten hitsausparametrien säädöt vaikuttavat hitsin

laatuun eli liitoksen kykyyn täyttää sille asetetut tekniset ja toiminnalliset vaatimukset. Tulosten perusteella muodostetaan myös käsitys tulevaisuuden tutkimustarpeista.

Tämän työn tutkimuskysymykset ovat:

K1: Mitkä ovat käsilaserhitsauksen merkittävimmät hitsin laatuun vaikuttavat haasteet?

K2: Miten käsilaserhitsauksen hitsausparametrit vaikuttavat hitsin laatuun?

Tutkimuskysymysten lisäksi työssä tarkastellaan myös prosessin hitsausteknisiä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat hitsin syntymiseen ja ominaisuuksiin. Työ ei sisällä käsilaserhitsauslaitteiston yksityiskohtaista teknistä tarkastelua eikä hitsaustyön turvallisuusnäkökulmia, vaikka ne ovatkin ehdottoman tärkeitä käsilaserlaitteiston käyttöönotossa. Työssä ei myöskään keskitytä käsilaserhitsauksen laajempaan vertailuun muihin hitsausmenetelmiin, vaikka yksittäisiä vertailuja esitetään.

Työn menetelmänä käytetään kuvailevaa kirjallisuuskatsausta. Tarkoituksena on muodostaa tutkimuskysymykset, valita niiden pohjalta aineistot sekä rakentaa ymmärrettävä kuvaus ja jäsenitys. Lopuksi hankittua tietoa analysoidaan. [6] Työssä kootaan ja yhdistetään kirjallisuutta, vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita, konferenssijulkaisuja, lehtiartikkeleita, hitsauslaittevalmistaja Kempin oppimateriaaleja, kaupallisten yritysten prosessikuvauksia sekä laserhitsauksen laadunhallinnan standardeja.

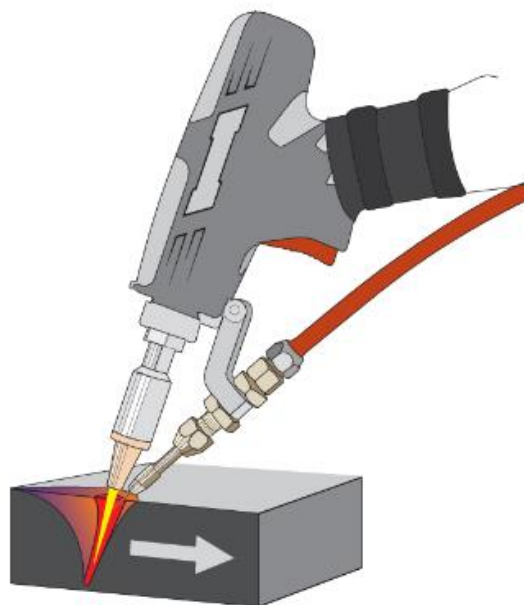
Lähteiden valinnassa ei ole asetettu merkittävää painoarvoa julkaisuvuodelle, koska hitsausprosessia kuvaavat peruslainalaisuudet on voitu kuvata jo kauan sitten. Kandidaatintyössä on käytetty ensisijaisesti alkuperäisiä julkaisuja, mutta tuoreempia lähteitä on suosittu aina, kun se on ollut mahdollista. Lähteitä on haettu tekoälyavusteisesti, minkä jälkeen ne on poimittu ANDOR-tietokannasta. Lisäksi lähteitä on haettu suoraan ANDOR-tietokannasta sekä Google Chromen kautta. Työssä on hyödynnetty myös Hitsaus Tekniikka -lehteä sekä käsilaserhitsausta koskevia kansainvälisen hitsausinstituutin (IIW, engl. International Institute of Welding) konferenssilähteitä.

Tutkielman luvussa 2 käsitellään käsilaserhitsauksen ominaisuuksia, laadunhallintaan liittyviä standardeja, sekä lopuksi prosessin haasteita. Luku 3 esittelee käsilaserhitsauksen hitsausparametrit sekä laitekohtaisten ominaisuuksien vaikutuksen hitsaustulokseen. Luvussa 4 vastataan tutkimuskysymyksiin arvioimalla kirjallisuuskatsauksen aineistoa sekä pohtimalla tutkimusten luotettavuutta ja tulevia tutkimustarpeita. Lopuksi luku 5 päättää työn kokoamalla keskeiset tulokset.

## 2. KÄSILASERHITSAUKSEN PROSESSIKUVAUS

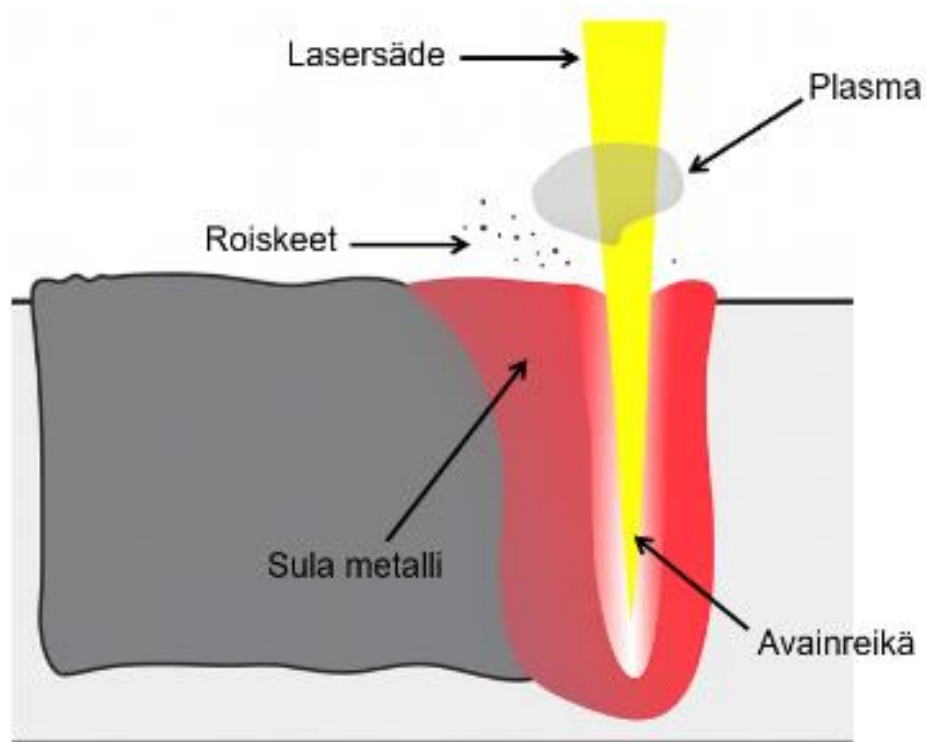
Käsilaserhitsauksessa suuritehoinen lasersäde kohdistetaan työstettävään kappaleeseen, jolloin sen pinta sulaa ja kiehuu muodostaen syvän ja kapean hitsin [7, s. 823]. Kappaleen pintaan muodostunut hitsisula on suojattava suojakaasulla, jotta sulan metallin kemialliset reaktiot ympäröivän ilman kanssa voidaan estää [8, s. 451]. Käsilaserhitsauksessa säteen kohdistaminen tapahtuu käsin pidettävällä hitsauspolttimella. Säteen kohdistamisen lisäksi polttimen kautta syötetään suojakaasua ja lisäainelankaa ennalta asetetuilla arvoilla. Lisäainelangan syöttö kasvattaa hitsisulan kokoa, mutta menetelmä voidaan toteuttaa myös ilman lisäainelangan syöttöä. [1]

Käsilaserhitsauslaitteisto perustuu kuitulasertekniikkaan, jossa valo vahvistetaan optisen kuidun ytimessä [9, s. 19, katso 10]. Kuitulasersäteilaitteiston etuna on kuidun tarjoama moodirakenne, jonka ansiosta lasersäde voidaan fokusoida tarkemmin kuin monilla muilla perinteisillä lasereilla. Moodirakenne kuvaa, millä tavoin valo etenee optisen kuidun ytimen läpi. Moodirakenteen mahdollistaman tarkan kohdistuksen ansiosta samalla laserteholla voidaan saavuttaa syvempi tunkeuma (engl. weld penetration) kuin lasereilla, joiden tarkennuskyky on heikompi. [11, s. 213] Lasersäteen korkean laadun ja suuren tehon ansiosta energia voidaan kohdistaa kappaleeseen riittävällä intensiteetillä, jolloin syntyy niin sanottu avaimenreikäilmiö (engl. keyhole welding). Ilmiö on nimetty kapeasta ja syvästä, avaimenreikää muistuttavasta hitsingeometriasta, jota havainnollistetaan kuvassa 1. [1]



**Kuva 1.** Käsilaserhitsauksen periaatekuva [1]

Avaimenreikähitsauksessa metallin voimakas höyrystyminen aiheuttaa paineen, jonka seurauksena sulaan hitsiin muodostuu syvä ja kapea kuoppa. Lasersäde pääsee kulkemaan avaimenreiän muodostaman kuopan kautta syvemmälle materiaaliin. Osa materiaaliin kohdistuvasta säteilystä absorboituu ja osa heijastuu kohti uusia pintoja. Avaimenreiän sisällä lasersäteily heijastuu avaimenreiän seinämiin useita kertoja, mikä lisää hitsin tunkeumaa kokonaisabsorption kasvaessa. Hitsausprosessissa energian siirtyminen ei siten perustu ensisijaisesti lämmön johtumiseen, vaan energia kohdistumiseen suoraan syvemmälle materiaaliin avaimenreiän kautta. [12, s. 182–183] Tarkan lämpöenergian kohdistamisen vuoksi laserhitsauksessa saman tunkeuman saavuttamiseksi tarvittava kokonaislämmöntuonti jää kaarihitsausmenetelmiä pienemmäksi [1]. Avaimenreikäilmiö on havainnollistettu kuvassa 2.



**Kuva 2.** Avainreikäilmiön periaatekuva (Muokattu lähteestä [13])

Volppin ja Vollertsenin (2016a) mukaan avaimenreiän dynaaminen vakaus on keskeinen tekijä laserhitsauksessa esiintyvien laatuvirheiden synnyssä [14, s. 443]. Laatuvirheellä tarkoitetaan tilannetta, jossa hitsi ei enää täytä sille asetettuja teknisiä ja toiminnallisia vaatimuksia [15][16]. Avaimenreiän vakaus saavutetaan, kun metallihöyryn aiheuttama paine ja sulan metallin pintajännitys ovat keskenään dynaamisessa tasapainossa. Höyrystymispaine pyrkii avaamaan avaimenreiän, kun taas pintajännitys toimii

palauttavana voimana. Tasapainotilassa avaimenreikä on dynaamisesti vakaa, mikä ilmenee vastakkaisten voimien pienenä amplitudivaihteluna. [14][17]

## 2.1 Laservalo

Käsite laser on lyhenne englanninkielisestä määritelmästä ”Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. Lasersäteen synty perustuu stimuloituun emissioon, jossa jo olemassa oleva fotoni saa atomin luovuttamaan uuden, täsmälleen samanlaisen fotonin. Tämän seurauksena valoa kyetään vahvistamaan. Käytännössä stimulointi toteutetaan laserlaitteiston resonanssikammiossa, jossa fotonit heijastuvat edestakaisin kahden peilin välillä. Heijastuva säteily stimuloi atomeja vapauttamaan lisää samanlaisia fotoneja, jolloin valon intensiteetti kasvaa nopeasti. Lopulta osa valosta pääsee ulos osittain läpäisevän peilin kautta muodostaen kapean ja suunnatun lasersäteen. [11, s. 11–16][18]

Seuraavassa luettelossa esitetään lasersäteen keskeisimmät ominaisuudet, jotka mahdollistavat säteen tarkan kohdistamisen ja korkean tehointensiteetin työstettävän kappaleen pintaan [11]:

1. Monokromaattisuus tarkoittaa, että lasersäteellä on käytännössä vain yksi aallonpituus ja siten yksi väri. [11]
2. Kollimoitu säde on lähes yhdensuuntainen ja säilyttää muotonsa pitkänkin matkan päähän. [19, s. 305]
3. Koherentti valo kykenee säilyttämään valoaallon vaihe-eron ennallaan. [11]

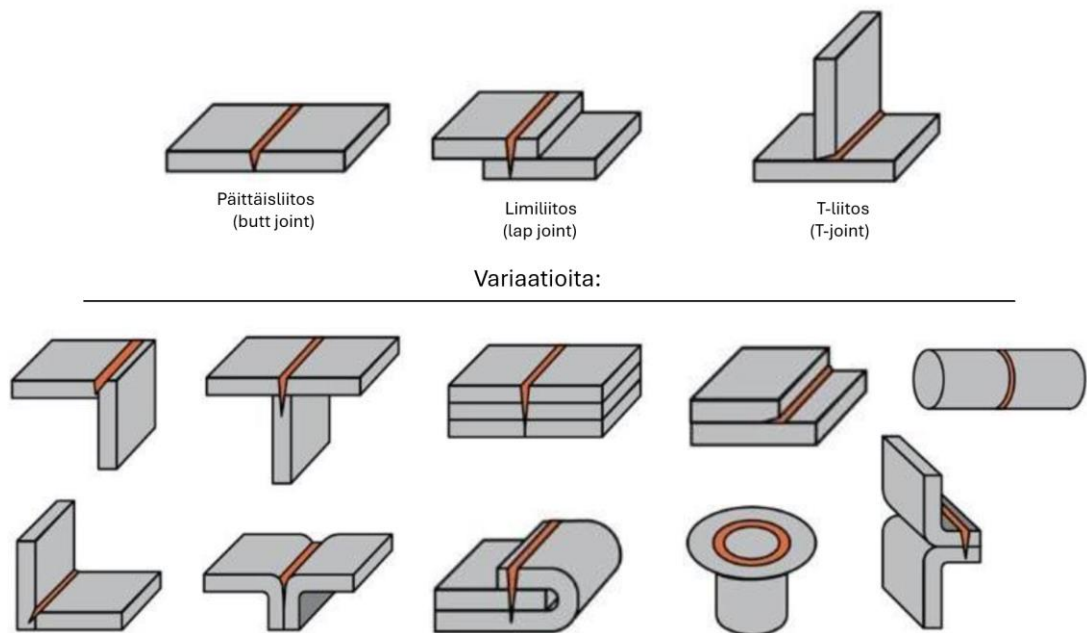
Lasersäteen intensiteettijakaumalla tarkoitetaan tehotiheyden jakautumista säteen poikkipinta-alalla. Jakauma noudattaa Gaussin käyrän muotoa erityisesti laserhitsausprosesseissa, joissa pyritään maksimoimaan säteen aiheuttama tunkeuma. Gaussin jakaumaa noudattavassa säteessä valo on voimakkainta säteen keskellä ja heikkenee reunoja kohti. Käytännössä lasersäteet kuitenkin poikkeavat ideaalisesta Gaussin muodosta. [11][20] Standardin SFS-EN 1011-6:2018 mukaan lasersäteiden intensiteettijakauman poikkeamaa varten on kehitetty säteen laatua kuvaava parametri  $M^2$  [20].

Kun lasersäde kohdistuu materiaalin pintaan, sen ja aineen välille syntyy useita fysikaalisia vuorovaikutuksia. Säteily voi heijastua, absorboitua, taittua tai siroutua riippuen sekä säteen että materiaalin pinnan ominaisuuksista. Lasersäteiden käyttäytymiseen materiaalissa vaikuttavat säteen ominaisuudet, kuten aallonpituus, intensiteetti, tulokulma ja sähkömagneettiset ominaisuudet. Myös materiaalin omat

ominaisuudet, kuten sähkönjohtavuus, pinnan karheus ja kiderakenne, vaikuttavat siihen, miten säde vuorovaikuttaa pinnan kanssa. Absorboitunut energia ilmenee materiaalissa lämpenemisenä, sulamisena, kiehumisena ja jopa plasman muodostumisena riippuen lasersäteen tehottiheyden suuruudesta. [11] [21, s.19–22]

## 2.2 Hitsattavat liitokset

Käsilaserhitsaus mahdollistaa erittäin monipuoliset liitosratkaisut, mutta samalla se asettaa haasteita hitsin toteutukseen. Menetelmä tarjoaa manuaalihitsauksen joustavuuden sekä mekanisoidun laserhitsauksen syvän tunkeuman profiilia edellyttävät liitokset. [22] Laserhitsauskäsikirjan (2018) mukaan yleisimpiä liitosmuotoja laserhitsauksessa ovat limi-, T-, sekä päittäisliitokset, joiden perusteella on esitetty myös muita variaatioita kuvassa 3 [1][9, s. 21].

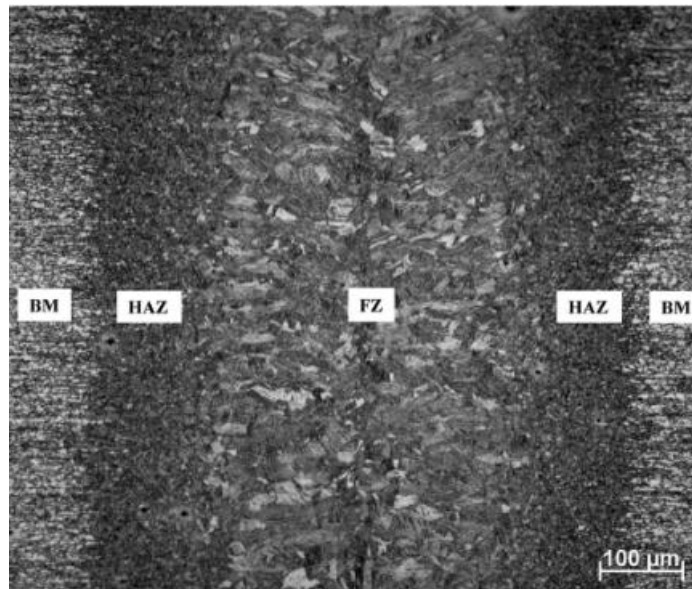


**Kuva 3.** Käsilaserhitsausprosessille soveltuvia liitostyyppejä (Muokattu lähteestä [1])

Avaimenreikähitsauksen mahdollistama syvä tunkeuma avaa perinteisiin kaarihitsausmenetelmiin verrattuna uusia liitosmahdollisuuksia. Mekanisoituun laserhitsaukseen verrattuna käsilaserhitsaus tarjoaa enemmän joustavuutta hitsausasentojen suhteen. [22] Hitsausmenetelmän joustavuus ilmenee esimerkiksi lakiasennon (engl. overhead position) hyödyntämisen mahdollisuutena [22, s. 16–17]. Käsilaserhitsauksella voidaan lisäksi liittää paksuja kappaleita monipalkohitsauksen avulla, jossa liitos toteutetaan usealla päällekkäisellä hitsillä [23].

## 2.3 Käsilaserhitsien mikrorakenne ja mekaaniset ominaisuudet

Laserhitsin poikkileikkaus jaetaan kolmeen päävyöhykkeeseen: sulamisvyöhykkeeseen (FZ engl. Fusion Zone), lämpövaikutusalueeseen (HAZ, engl. Heat Affected Zone) sekä perusmateriaaliin (BM, engl. Base Material). Näiden vyöhykkeiden metallurgiset ominaisuudet eroavat toisistaan, mikä vaikuttaa suoraan liitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. [24] Kuvassa 4 esitetään makrohioittu laserhitsin poikkileikkaus, jossa liitosvyöhykkeet on havainnollistettu. Makrohionnassa hitsi leikataan, hiotaan ja syövytetään kemiallisesti, jotta hitsirakenteen piirteet voidaan havaita poikkileikkauksesta. [25] Kuvasta havaitaan, että sulamisvyöhykkeen mikrorakenne on karkeampi kuin lämpövaikutusalueella, jonka raerakenne on selvästi hienojakoisempi. Raekokoa ja mikrorakenteen piirteitä voidaan hyödyntää arvioitaessa esimerkiksi materiaalin kovuutta ja sitkeyttä. [24]



**Kuva 4.** Mikroskooppinen kuva hitsistä [24]

Lämpövaikutusalueella (HAZ) on keskeinen rooli materiaalin käyttäytymiselle. Vaikka alue ei sula hitsauksen aikana, siihen kohdistuva lämpötilanmuutos voi aiheuttaa merkittäviä mikrorakenteellisia muutoksia. Nämä muutokset heijastuvat suoraan perusaineen lujuuteen, kovuuteen, sitkeyteen ja korroosionkestävyyteen. Koska laserhitsauksessa lämmöntuonti on tyypillisesti paikallisempaa, HAZ on usein huomattavasti kapeampi kuin kaarihitsauksessa, mikä voi vähentää ei-toivottua ominaisuuksien heikkenemistä. [9] Korkealujuisteräksiä (HSS, engl. High Strength Steel) vertailevan tutkimuksen mukaan laserhitsauksessa muodostunut lämpövaikutusalue oli jopa kymmenen kertaa kapeampi kuin aktiivikaasukaarihitsauksessa (MAG, engl. Metal Active Gas Welding) [26, s. 71]. Pienempi lämpövaikutusalue on usein tavoiteltavaa, mutta sen vaikutukset riippuvat hitsausolosuhteista [27].

Hietala et al. (2018) mukaan voidaan yleisesti todeta, että mitä kapeampi laserhitsi on, sitä lujempi se on suhteessa hitsin pinta-alaan, kun on käytetty ”järkeviä” hitsausparametrejä [9, s. 43]. Tämä johtuu siitä, että kapeammalla hitsillä lämmöntuontienergia on yleensä pienempi, jolloin sula-alue on tyypillisesti lujempi. Laserhitsauskäsikirjan mukaan on kuitenkin huomioitava, että leveämpi hitsi on yleisesti liitoksena parempi. [9, s. 43]

Yang et al. (2024) tutkivat lisäainelangan vaikutusta laserhitsin laatuun [28]. Tutkimuksen mukaan lisäainelangan koostumus vaikuttaa merkittävästi sulamisvyöhykkeen (FZ) mikrorakenteeseen ja paikallisiin mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisäaineen vaikutus liittyy siihen, miten lanka muuttaa sulamisvyöhykkeen kemiallista koostumusta ja jäähtymiskäyttäytymistä. Näin lisäainelangan valinnalla voidaan vaikuttaa hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten kovuuteen ja myötölujuuteen. [28]

## 2.4 Käsilaserhitsauksen laadunhallinnan standardit

Käsilaserhitsauksen laadunhallintaan liittyvillä standardeilla määritellään hitsin laatuun kohdistuvat hitsaustekniset vaatimukset. Mikäli hitsille on asetettu laatuvaatimuksia, hitsaus tulee suorittaa hyväksytyin hitsausohjeen (WPS, engl. Welding Procedure Specification) mukaisesti. Standardin SFS-EN ISO 15609-4 avulla varmistetaan, että käsilaserhitsaukseen liittyvä WPS-dokumentti on riittävän kattava. Hitsausohjeen tulee sisältää olennaiset hitsausparametrit, joiden avulla voidaan varmentaa hitsatun liitoksen laatu. [29] Käsilaserhitsauksessa sovellettavat standardit on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** SFS-käsikirja 66–14:2024 Laserhitsauksen laadunhallintaan liittyviä standardeja. Kerätty käsikirjan sisällysluettelosta [30]

Standardi	Nimi
SFS-EN 1011-6:2018	Laserhitsaus – suositukset metallisten materiaalien hitsaukseen
SFS-EN ISO 13919-1:2019	Elektroni- ja laserhitsattujen liitosten laatuvaatimukset – Osa 1
SFS-EN ISO 13919-2:2019	Elektroni- ja laserhitsattujen liitosten laatuvaatimukset – Osa 2
SFS-EN ISO 15609-4:2009	Hitsausohjeiden laadinta – Osa 4: laserhitsaus
SFS-EN ISO 15614-11:2002	Menetelmäkokeet – Elektroni- ja laserhitsaus

Hitsausohjeen laatimista varten hitsille on tehtävä standardin SFS-EN ISO 15614-11 mukainen menetelmäkoe (engl. Welding Procedure Test). Menetelmäkoe on virallinen testi, jolla varmistetaan, että hitsausmenetelmä täyttää sovellukselle asetetut laatuvaatimukset. [31][32] Käsilaserhitsien laatuvaatimusten hyväksymisrajat määritellään virhe- ja laatuvaatimuksia koskevissa standardeissa. Virhestandardi SFS-EN ISO 13919-1:2019 esittää vaatimukset teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seoksien laatuoluokille, kun taas SFS-EN ISO 13919-2:2021 koskee alumiinia, magnesiumia sekä niiden seoksia ja puhdasta kuparia. Molemmat standardit perustuvat hitsausvirheiden luokittelustandardiin SFS-EN ISO 6520-1, jossa määritellään eri virhetyypit. Virhestandardeissa esitetään laatusot B, C ja D, joiden avulla määritetään hitsattavan liitoksen virheiden hyväksyttävät rajat. Laatusot eivät ota kantaa mihinkään tiettyyn sovellukseen, vaan vaatimukset määritetään yksittäisiin hitseihin. [15][16][33]

## 2.5 Käsilaserhitsauksen laadunhallinnan haasteet

Standardi SFS-EN 1011-6:2018 antaa ohjeita ja suosituksia metallisten materiaalien lasersädehitsaukseen. Standardin tarkoituksena on tukea esimerkiksi suunnittelijoita ja hitsausinsinöörejä laserhitsausmenetelmän turvallisessa ja laadukkaassa soveltamisessa. Standardissa esitetään myös useita laserhitsausprosessiin liittyviä haasteita ja rajoituksia. [20] Seuraavassa luettelossa on koottu keskeisimmät käsilaserhitsauksen laadunhallinnan haasteet:

1. Hitsausprosessin toistettavuus. [5]
2. Huokoisuuden muodostuminen. [20]
3. Suuret jäähtymisnopeudet. [20]
4. Hitsattavien railojen tarkkuus ja ilmaraon vaihtelut. [5]
5. Liitospintojen sekä lisäaineen puhtaus. [5][20]
6. Metallin höyrystymisestä muodostuva plasmapiilvi. [34]

### Hitsausprosessin toistettavuus

Luettelon ensimmäisessä kohdassa mainittu hitsausprosessin toistettavuus liittyy vahvasti valmistetun hitsin geometriaan. Laserhitsauksen virhestandardeissa on asetettu tiukat geometriset rajat hitsin muodolle. Nämä standardit koskevat sekä mekanisoituja, että manuaalisesti toteutettavia hitsejä, joten käsilaserhitsien laadun tulee olla samalla tasolla kuin mekanisoidusti hitsattujen liitosten. Pienet käden heilahtelut tai hitsausnopeuden muutokset voivat aiheuttaa avaimenreiän epävakautta, mikä voi näkyä virheenä hitsin geometriassa. [1][15][16]

Geometrian hallinnan vuoksi hitsausparametrien on oltava tarkasti säädettävissä ja toistettavia. Esimerkiksi 3 mm:n teräslevyn laatutason B päittäisliitoksessa hitsin kuperuus saa olla enintään 1 mm ja vähintään 0,3 mm perusaineen pintaa matalampi. Juuren puolella hitsin tulee olla täysin läpihitsautunut, ja juuren paksuus saa olla enintään 1 mm. Virherajat vaihtelevat aineenvahvuuden ja materiaalin mukaan siten, että esimerkiksi alumiinilla vastaavat rajat ovat vapaammat. [15][16] Kuvasta 5 nähdään epävakaa avaimenreiän vaikutus hitsiin.



**Kuva 5.** Laserhitsin pinnan laatuvirheet 511 (vajaa kupu) ja 502 (korkea kupu)

Avaimenreiän vakaus vaikuttaa merkittävästi laserhitsauksen toistettavuuteen ja sitä kautta hitsin geometriseen muotoon. Tarkat geometriset laatuvaatimukset eivät salli suurta epävakautta avaimenreiässä. Epävakaus aiheuttaa tunkeuman vaihtelua ja sulasta irtoavia metalliroiskeita, jotka voivat aiheuttaa virheitä hitsin laatuun. [14][35] Tämä havainnollistuu kuvassa 5, jossa sulasta irronnut metalliroiske on jähmettynyt hitsin päälle ja muodostanut pintaan laatuvirheet 511, *vajaa kupu* (riittämätön railon täyttyminen), sekä 502, *korkea kupu* (liian suuri kuvun korkeus) [16][33].

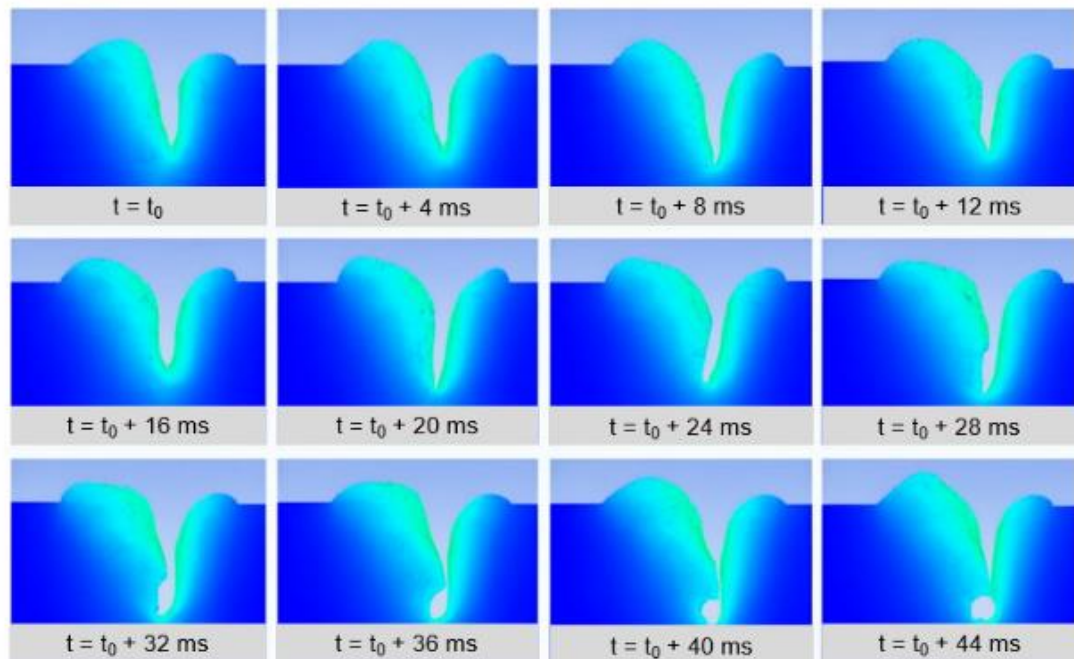
Volpp:in (2016b) tutkimuksessa roiskeiden syntyä on analysoitu yksityiskohtaisesti [35]. Epävakaa avaimenreiässä seinämien kokemat paineenvaihtelut aiheuttavat sulan pinnalle muodostuvia pieniä pullistumia, jotka voivat irrota avaimenreiästä höyryvirtausten seurauksena. [35, s. 13] Suurempien metalliroiskeiden irtoaminen aiheuttaa sulan materiaalin menetystä ja johtaa herkästi laatuvirheisiin [15][16].

### **Huokoisuuden muodostuminen**

Toinen luettelossa mainittu hitsin laadunhallinnan haaste on hitsiin muodostuvat huokokset. Huokoisuus liittyy useisiin virhetyyppeihin, joita määritellään

sulahitsausvirheitä luokittelevassa standardissa SFS-EN ISO 6520-1. Standardin virhenumero 516 *huokoisuus juuressa* tarkoittaa tilannetta, jossa kaasukuplat muodostuvat hitsisulaan ennen jäähmettymistä ja jäävät hitsiin heikentäen perusaineen rakennetta. Virhenumero 2013 *huokosryhmä* kuvaa useiden huokosten muodostamaa paikallista joukkoa, ja virhenumero 2014 *huokosjono* tarkoittaa hitsin suuntaisesti sijoittuvien huokosten muodostamaa jonoa. [33]

Huokoisuuden arvioinnissa noudatetaan standardeja SFS-EN ISO 13919-1:2019 ja SFS-EN ISO 13919-2:2021, joissa määritellään huokosten yhteenlasketun projektioalan suurin sallittu koko. Projektioala tarkoittaa yhdensuuntaista pinta-alaa, jonka avulla arvioidaan kuinka suuri osuus tarkasteltavasta alueesta saa olla huokoista. Huokosten prosentuaalisen määrän lisäksi standardeissa on määritelty yksittäisen huokosen suurin sallittu koko sekä huokosten välinen vähimmäisetäisyys. Jos kaksi huokosta sijaitsee liian lähellä toisiaan, ne arvioidaan yhdeksi yhdistetyksi huokoseksi, jolloin tarkastelussa huomioidaan niiden yhteinen pituus. [15][16] Kuva 6 esittää avaimenreiän epävakaudesta johtuvaa huokosen muodostumisprosessia eri ajan hetkillä.



**Kuva 6.** Avaimenreiän takaseinämän pullistumisesta johtuva kuplien muodostumismekanismi (Muokattu lähteestä [17])

Laserhitsauksessa avaimenreiän syvyyden spontaanit vaihtelut ja häiriöt voivat edistää kaasukuplien muodostumista metalliseen hitsisulaan [17, s. 2]. Avaimenreiän epävakauden lisäksi myös hitsattavan railon epäpuhtaudet voivat lisätä huokoisuutta [8]. Hitsatun liitoksen huokoisuuden synty edellyttää kahta peräkkäistä ilmiötä: kaasukuplan muodostumista ja kuplan vangiksi jäämistä sulaan metalliin [36, s. 1077]. Kaasukuplia

voi syntyä, kun avaimenreiässä hitsisulan seinämät pullistuvat ja romahtavat kuvassa 6 esitetyn mekanismin mukaisesti [17]. Laserhitsauksessa nopea jäähtyminen edistää sulan jähmettymistä ennen kuin kaasukuplat ehtivät poistua sulasta. Tällöin kaasukuplat jäävät hitsiin huokosina. Lisäksi suojavaasun ominaisuudet vaikuttavat sulan virtausolosuhteeseen ja siten huokoisuuden syntyyn. [36, s. 1077] Suojaavaasun vaikutusta huokoisuuteen käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.3.

### **Suuret jäähtymisnopeudet**

Asikainen (2025) mukaan laserhitsin nopea jäähtyminen voi aiheuttaa materiaalin mikrorakenteen karmenemista sekä lisätä kuumahalkeilun riskiä [5, s. 13]. Nopean jäähtymisen aikana hitsiin syntyy myös sisäisiä jännityksiä, jotka voivat ”repiä” hitsiä auki. Edellä mainituista haasteista huolimatta rakeenkasvu on yleensä maltillista laserhitsauksen pienen lämmöntonni ansiosta. Kuumahalkeilun riskiä voidaan tarvittaessa pienentää säätämällä hitsausparametrejä siten, että jäähtymisaika pitenee, esimerkiksi pienentämällä hitsausnopeutta tai muuttamalla vaaputusparametrejä. Vaaputuksella tarkoitetaan lasersäteen edestakaista liikettä, joka toteutetaan hitsauspolttimen optiikan avulla. Hitsin jäähtymisnopeuden vaikutukset riippuvat voimakkaasti hitsattavasta materiaalista, joten niitä ei voida yleistää. [5]

### **Hitsattavien railojen tarkkuus ja ilmaraon vaihtelut**

Laserhitsauksen liitoksiin liittyvät haasteet koskevat pääasiassa työstettävien kappaleiden sovitteen tarkkuusvaatimuksia. Laserhitsauksen kapean säteen vuoksi kappaleiden välinen ilmaraiko on pidettävä hyvin pienenä, jotta säde ei pääse kulkemaan niiden välistä. [9, s. 23] Laserhitsauksessa pyritään tyypillisesti lähes olemattomaan ilmarakoon, mutta käsilaserhitsauksessa lisäaineen ja vaaputuksen avulla hitsaus voi onnistua, vaikka ilmarakoa olisi noin 0–1,3 mm [2]. Laserhitsauksen kapean säteen vuoksi on varmistettava molempien kappaleiden sulaminen. Esimerkiksi liitoksen sivusta laserhitsatussa pienaliitoksessa on oltava erityisen tarkka kohdistuksen suhteen, jotta kapea säde osuu molempiin kappaleisiin. [9, s. 25]

### **Liitospintojen sekä lisäaineen puhtaus**

Käsilaserhitsauksen puhtauteen tulee kiinnittää erityistä huomiota jo hitsausten esivalmistelussa. Laserhitsatun liitoksen syvä ja kapea hitsigeometria altistaa liitoksen epäpuhtauksien haitallisille vaikutuksille, minkä vuoksi hitsattavat pinnat tulee puhdistaa huolellisesti. [5, s. 13] Kenéz et al. (2023) mukaan epäpuhtauksien joutuminen hitsiin on haitallista, koska ne voivat reagoida metallin kanssa korkeissa lämpötiloissa hitsauksen aikana [37]. Tutkimuksessa epäpuhtauksien on havaittu aiheuttavan liitosvirheitä, huokoisuutta sekä mikrohalkeamia. [37, s. 2]

### **Metallin höyrystymisestä muodostuva plasmopilvi**

Laserhitsauksessa perusaineen höyrystyminen synnyttää plasmopilven (kuva 2), joka muodostuu hitsattavan kappaleen yläpuolelle. Plasmopilvi koostuu höyrystyneestä perusmateriaalista, joka purkautuu ulos avaimenreiästä hitsauksen aikana. Plasmopilvi vaikuttaa prosessin dynamiikkaan, sillä se voi sekä sirottaa että absorboida lasersäteilyä, mikä heikentää avaimenreiän vakautta ja hitsin tunkeumaa. Plasmopilven vaikutus avaimenreikään voimistuu hitsaustehon kasvaessa, koska lisääntynyt höyrystyminen kasvattaa plasmopilven sakeutta ja tilavuutta. [11, s. 208][34]

### 3. KÄSILASERHITSAUKSEN PARAMETRIEN VALINTA

Hitsausparametreillä tarkoitetaan hitsausmenetelmän mukaisen hitsauksen suorittamiseen tarvittavia tietoja [38, s. 75]. Käsilaserhitsauksen onnistunut toteutus edellyttää hitsausparametrien tuntemista ja hallintaa. Keskeisiä hitsausparametrejä ovat laserteho, hitsausnopeus, polttopisteen koko ja sijainti, suojakaasu ja sen virtausnopeus, säteen vaaputus sekä suoritustekniikka, jotka vaikuttavat suoraan hitsin laatuun. Oikeiden asetusten valinta mahdollistaa tasalaatuisen hitsin ja vähentää virheitä, kuten huokoisuutta ja geometriapoikkeamia. [1][5]

Hallittu lämmöntuonti käsilaserhitsauksessa edellyttää hitsausnopeuden ja lasertehon yhteensovittamista. Hitsausnopeus määräytyy pitkälti langansyöttönopeuden mukaan, koska hitsauspolttimesta ulos työntyvä lisäainelanka ohjaa hitsaajan kädessä pitämän hitsauspolttimen liikkeen nopeutta. Vakionopeudella syötettävän lisäainelangan avulla saavutetaan tasainen ja hallittu kuljetusnopeus. Hitsausnopeutta pienentämällä tunkeumaa voidaan kasvattaa, kunnes avaimenreiän sisäinen höyrynpaine ei enää riitä ylläpitämään avaimenreikää hitsisulan pintajännityksestä aiheutuvaa painetta vastaan. [2][14] Asikaisen (2025) mukaan liian suuri laserteho tai hidas kuljetusnopeus voi heikentää avaimenreiän vakautta [5, s. 13].

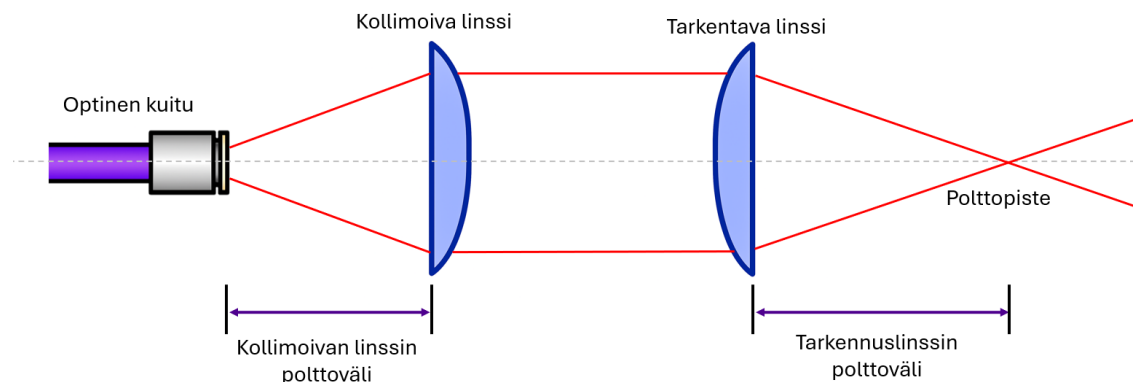
Laserhitsauksen lämmöntuontia käsittelevässä tieteellisessä artikkelissa esitetään lämmöntuonnin riippuvan lasertehon ja hitsausnopeuden suhteesta. Pelkästään näiden perusteella hitsattavan materiaalin todellista lämmöntuontia ei kuitenkaan voida arvioida, vaan tarkastelussa on huomioitava hitsausprosessin hyötysuhde. Hyötysuhde kuvaa, kuinka suuri osa lämpöenergiasta siirtyy käytännössä hitsattavaan materiaalin sulattamiseen tai höyrystämiseen. [39, s. 984] Lasersäteen absorptiota käsittelevän artikkelin mukaan hyötysuhdetta heikentäviä häviötä syntyy muun muassa heijastumisesta, konvektiivisesta lämmönsiirrosta, säteilystä sekä materiaalin haihtumisesta [40]. Lisäksi avaimenreiän epävakaus ja plasmapiilvi voivat heikentää hitsausprosessin hyötysuhdetta [34, s. 32–33].

Lämmöntuonnin merkitseminen on olennainen osa hitsausprosessin dokumentointia. Menetelmäkokeiden pöytäkirjoihin tulee merkitä hitsausparametrien ohella kappaleeseen kohdistunut lämmöntuonti. [29][31] Salmisen (2001) tutkimuksessa arvioitiin, että mekanisoidussa lisäainelangallisessa laserhitsauksessa absorption vaihteluväli on 13–71 % hitsausolosuhteista riippuen [41]. Mekanisoidussa

laserhitsauksessa laadullisesti hyväksyttävän hitsin absorptio on tyypillisesti yli 50 % [41]. Koska absorptio määrittää, kuinka suuri osa lasersäteilyn energiasta siirtyy kappaleeseen, sillä on olennainen vaikutus lämmöntuonnin arviointiin [39]. Käsilaserhitsauksesta ei kuitenkaan ole löytynyt tutkimuksia, joissa absorptioastetta olisi arvioitu, mikä vaikeuttaa menetelmän lämmöntuonnin luotettavaa arviointia.

### 3.1 Polttopisteen koko, tarkennus ja energian tiheys

Laserhitsauksessa polttopisteellä tarkoitetaan lasersäteen halkaisijaa tarkennuskohdassa, jossa säteen vyötärö on kapeimmillaan ja energian intensiteetti suurimmillaan. Polttopisteen (engl. focus point) halkaisija määrittää alueen koon, jolle lasersäde kohdistaa energiansa. Pienempi polttopiste tuottaa kohdistetumman lämmöntuonnin ja suuremman tehotiheyden, kun taas suurempaa polttopistettä hyödynnetään, kun energia halutaan jakaa laajemmalle alueelle. [1][14] Polttopisteen koko on laitekohtainen, mutta sen sijaintia voidaan hienosäätää [42]. Kuvassa 7 on havainnollistettu polttopisteen muodostumista ja siihen vaikuttavia tekijöitä.



**Kuva 7.** Kuidun ja linssien vaikutus polttopisteeseen (Muokattu lähteestä [43])

Polttopisteen hienosäätämällä vaikutetaan siihen, missä kohdassa lasersäde on kapeimmillaan [14]. K2 Lazer 3000 -laitteen käyttöohjeen mukaan asento 0 on yleensä paras lähtökohta, mutta asetusta voidaan säätää -10:n ja +10:n (ei yksikköä) välillä [42]. Negatiivisella tarkennussiirrolla polttopiste siirtyy syvemmälle materiaaliin, jolloin säde kohdistuu materiaalin sisäosiin. Tämä mahdollistaa suuremman tunkeuman ja on hyödyllinen erityisesti paksummissa kappaleissa. Positiivinen tarkennus puolestaan siirtää tarkennuspistettä käyttäjää kohti, lähemmäs materiaalin pintaa tai hieman sen yläpuolelle. Tällöin polttopiste on kohtaushetkellä suurempi, mikä tuottaa leveämmän mutta tunkeumaltaan heikomman hitsin. [1][42]

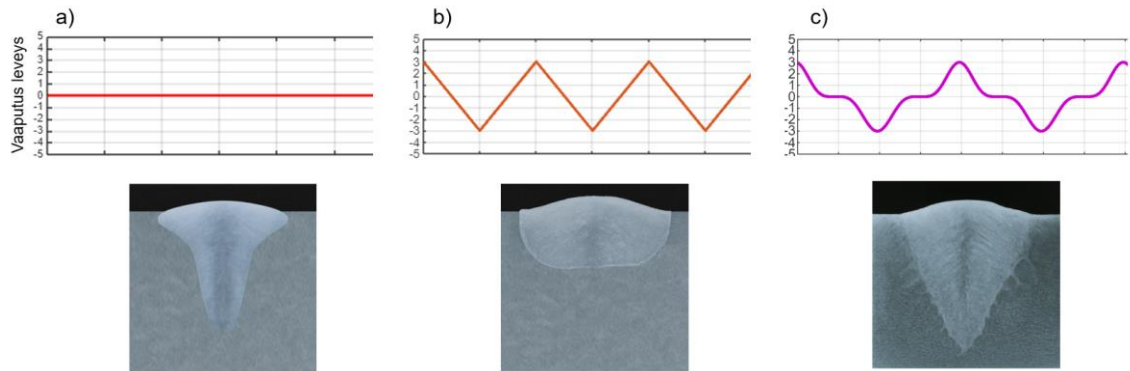
Polttopisteen sijainnin vaikutusta tarkastelevassa tutkimuksessa todettiin, että pienempään avaimenreiän seinämien värähtelyyn päästään, kun polttopiste sijoitetaan hieman pinnan alapuolelle (esimerkiksi  $Z_f = -2$  mm). Positiivinen tarkennus (esimerkiksi  $Z_f = +1$  mm) puolestaan lisäsi avaimenreiän värähtelyä ja tuotti suurempia amplitudin vaihteluita avaimenreiän seinämissä. [14, s. 449–452].

### 3.2 Lasersäteen vaaputus

Käsilaserhitsauksessa vaaputuksella tarkoitetaan lasersäteelle asetettua sivuttaissuuntaista liikettä, jonka avulla voidaan muokata hitsin geometriaa. Vaaputuksen avulla voidaan myös sallia suurempia kappaleiden välisiä ilmarakoja, koska lasersäde ei tällöin pääse kulkemaan kokonaan hitsattavien kappaleiden välistä. Säättämällä vaaputuksen parametrejä voidaan vaikuttaa hitsin geometriaan sekä avaimenreiän käyttäytymiseen. [5][44] Asikaisen (2025) mukaan säteen vaaputus voi edistää hitsisulan virtausta, jolloin huokokset pääsevät poistumaan hitsisulasta paremmin [5, s. 13].

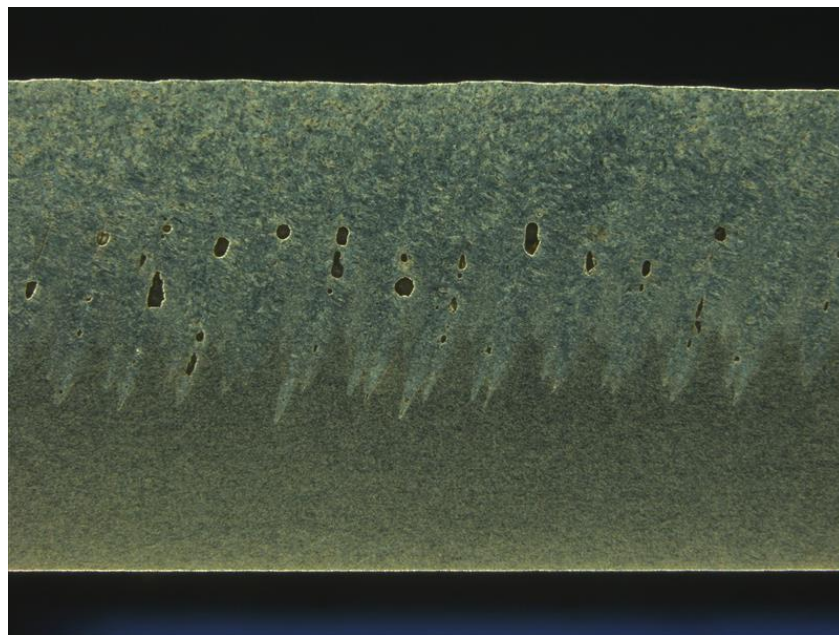
Käsilaserhitsauksessa käytetään yleisimmin yksiakselista vaaputuspeiliä, joka liikuttaa sädettä sivuttaissuunnassa. Mekanisoiduissa laserhitsauslaitteissa voidaan hyödyntää myös kaksiakselista vaaputusta, jonka avulla voidaan toteuttaa erilaisia vaaputuskuvioita. Käsilaserhitsauksessa vaaputusta voidaan pitää erityisen tärkeänä hitsausparametrinä, sillä sen avulla voidaan pienentää käyttäjän aiheuttamia säteen kohdistusvirheitä. [44] C. Cox (2025) esitteli IIW:n kesäkuussa järjestetyssä konferenssissa tutkimusta, jossa tarkasteltiin käsilaserhitsauksen vaaputuksen parametrejä ja niiden vaikutuksia hitsin laatuun [44].

Vaaputuksen amplitudilla tarkoitetaan lasersäteen sivuttaispoikkeamaa etenemissuunnan keskikohdasta nähden. Käsilaserhitsauslaitteissa amplitudin säätöalue voi olla esimerkiksi 0–5,00 mm välillä. [42] Suurella amplitudilla hitsi muodostuu leveämmäksi ja matalammaksi, kun taas pieni amplitudi tai vaaputuksen puuttuminen tuottaa kapeamman ja syvemmän hitsin. Kuvassa 8 on havainnollistettu, kuinka käsilaserhitsauksessa vaaputus sekä vaaputuksen aaltomuoto vaikuttaa hitsin geometriaan. [44]



**Kuva 8.** Hitsin geometrian erot: a) ilman vaaputusta b) kanttiaaltoisella vaaputuksella c) parabolisella vaaputuksella. (Muokattu lähteestä [44])

Vaaputuksen taajuuden vaikutusta käsilaserhitsiin tutkittiin makrohiekuvien avulla tarkastelemalla hitsausten pituus- ja poikittaisleikkauksia 25, 50 ja 100 Hz taajuuksilla. Tulosten mukaan alhainen vaaputustaajuus estää hitsin tasaisen sulamisen pituussuunnassa, jolloin sulamisvyöhykkeen reuna jää sahalaitaiseksi. Tällöin tunkeuma on epätasainen ja jää paikoin riittämättömäksi kohdissa, joissa lasersäde ei ole sulattanut materiaalia. Ilmiö johtuu siitä, että lasersäde etenee hitsauksen aikana, mutta vaaputus on matalalla taajuudella liian hidasta, jolloin materiaali ei ehdi sulaa tasaisesti koko alueelta. Epätasainen sulaminen voidaan välttää nostamalla vaaputustaajuutta esimerkiksi 50–100 Hz:iin. [44] Kuvassa 9 on esitetty matalan taajuuden vaaputuksella hitsattu pituussuuntainen makrohiekuva, jonka sulamisvyöhykkeen reuna on sahalaitainen.



**Kuva 9.** Käsilaserhitsin pitkittäissuuntainen makrohiekuva [1]

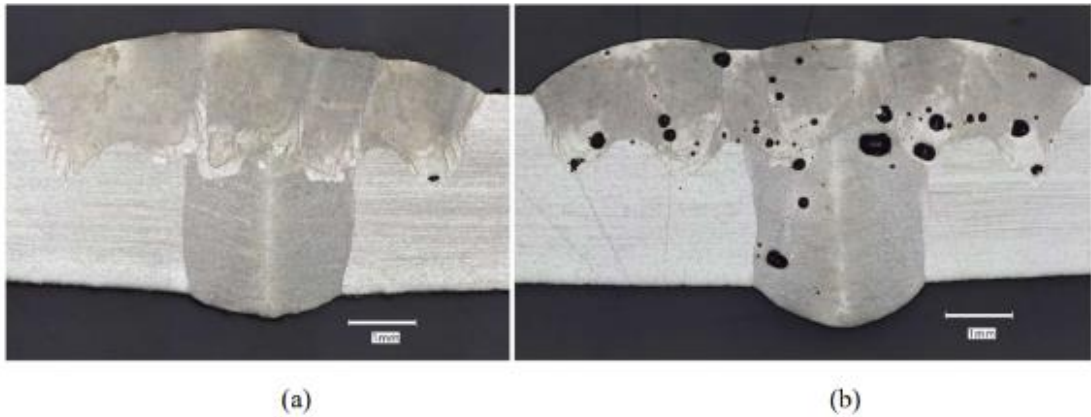
Yksi C. Cox:in (2025) esittämän tutkimuksen tavoitteista oli saavuttaa mahdollisimman tasainen tunkeuma kaikkiin hitsin suuntiin, mikä toteutuu tehokkaimmin pienentämällä lämpövaikutusaluetta [44]. Tutkimuksen tulosten perusteella vaaputustaajuuden suurentamisella voidaan pienentää lämpövaikutusaluetta. Laserhitsien poikkileikatuista makrohiekuvista havaitaan, että suuremmalla 100 Hz taajuudella hitsatun näytteen lämpövaikutusalue on selvästi pienempi kuin 50 Hz taajuudella. [44]

### 3.3 Suojakaasun ja virtausnopeuden valinta

Suojakaasulla on merkittävä rooli sulahitsausmenetelmissä, sillä sen tehtävänä on syrjäyttää ilman haitalliset kaasut hitsisulan ympäriltä. Hitsauksessa käytettävä suojakaasu voi olla joko inertti tai aktiivinen. Inertti suojakaasu (esimerkiksi argon tai helium) ei reagoi hitsisulan kanssa vaan suojaa sulan ympärillä olevan ilman haitallisilta vaikutuksilta. Aktiivinen suojakaasu (esimerkiksi hiilidioksidi tai typpi) voi suojaamisen lisäksi osallistua hitsaustapahtumaan ja vaikuttaa sulan käyttäytymiseen. [1] Asikaisen (2025) mukaan käsilaserhitsauksessa yleisimmin käytettyjä suojakaasuja ovat typpi ja argon [5, s. 13].

Laserhitsauksen suojakaasujen välisiä eroja tarkastelevassa tutkimuksessa todetaan typen ja argonin olevan heliumiin verrattuna tiheämpiä kaasuja [45, s. 6]. Suurempi suojakaasun tiheys voi helpottaa plasmapilven syrjäyttämistä ja parantaa hitsausprosessin vakautta verrattuna kevyempiin suojakaasuihin, kuten heliumiin. Lisäksi typen lämmönjohtavuuden on havaittu olevan noin 40 % korkeampi kuin argonin, mikä edistää plasmapilven jäähtymistä ja pienentää sen tilavuutta. Typen käyttö suojakaasuna on havaittu vähentävän huokoisuutta ruostumattomassa teräksessä, nikkeliissä ja hiiliteräksissä verrattuna argoniin. Tämä on esitetty johtuvan siitä, että typpi voi tietyissä olosuhteissa reagoida seosaineiden kanssa ja liueta hitsisulaan, mikä edistää kaasukuplien poistumista. Argonin kaltaisilla inerteillä kaasuilla tätä ilmiötä ei tapahdu. [45]

Myös IIW-konferenssissa esitetyn tutkimuksen mukaan argonin käyttö suojakaasuna voi lisätä huokoisuutta verrattuna tyypeen [22, s. 21–22]. Kuvassa 10 havainnollistetaan, miten suojakaasuna käytetty typpi ja argon vaikuttavat hitsin huokoisuuteen.



**Kuva 10.** Käsilaserhitsatut valomikroskooppikuvat 316L-ruostumattomalle teräkselle. a) Hitsaussuojakaasuna typpi b) Hitsaussuojakaasuna argon [22]

Kuvasta 10 ilmenee, että b-kohdassa suojakaasuna käytetty argon johtaa ruostumattoman teräksen hitsissä erittäin huokoiseen lopputulokseen (huokoisuus näkyy mustina pisteinä). Sen sijaan a-kohdassa typen käyttö suojakaasuna johtaa miltei olemattomaan huokoisuuteen. Tutkimuksessa havaintoa selitetään sillä, että typen on todettu stabiloivan austeniittisia materiaaleja, mikä pienentää hitsattavan metallin ferriittilukua. Alhaisemman ferriittiluvun avulla voi esiintyä vähemmän jähmettymisvikoja. [22, s. 21–23]

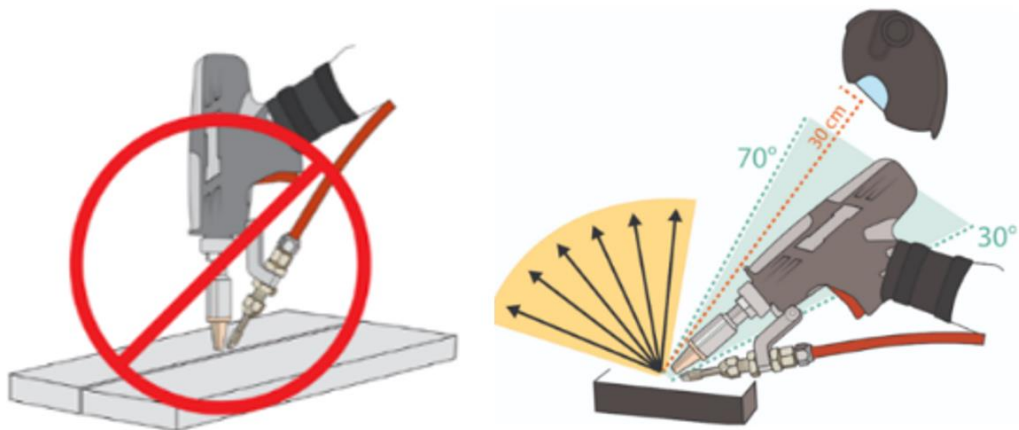
Suojakaasun virtauksen tulee olla riittävä jäähtyvän hitsin suojaamiseksi [22, s. 26]. Virtausnopeuden säätäminen riippuu käytetystä suojakaasusta, sillä tiheämmät kaasut muodostavat tehokkaamman suojan jo pienemmällä virtausnopeudella. Keveämmät kaasut, kuten helium, vaativat suuremman virtausnopeuden, koska ne ovat ilmaa kevyempiä ja poistuvat siten herkemmin hitsin yläpuolelta. [45] Laserhitsauksessa käytettäville suojakaasuille suuntaa antavia virtausnopeuksia on lueteltu seuraavasti [46]:

- Argon (Ar): 12–25 l/min
- Typpi (N<sub>2</sub>): 15–25 l/min
- Helium (He): 20–40 l/min

Suojakaasun virtausnopeutta säädettäessä on huomioitava myös virtaustapa. Laminaarinen kaasuvirtaus on hitsausprosessin kannalta suositeltava, sillä se tuottaa tasalaatuisimman suojauksen. Turbulentti virtaus heikentää suojakaasun laatua, koska suojakaasun sekoittuminen ympäröivän ilman kanssa aiheuttaa pyörteitä. Pyörteet ovat ongelmallisia, koska ne lisäävät hitsin roiskeisuutta, hapettumista ja huokoisuutta. [47, s. 391–392] Suojakaasun virtauksen laatu riippuu hitsauspolttimen ominaisuuksista, käytetystä virtausnopeudesta sekä kaasusuuttimen halkaisijasta [1].

### 3.4 Lisäainelangansyöttö ja suoritustekniikka

Käsilaserhitsauksen suoritustekniikka perustuu vetävään poltinkulmaan sekä lisäainelangan työntämisen aiheuttaman liikkeen hallintaan. Langansyöttönopeutta voidaan hyödyntää hitsausnopeuden vakiinnuttamisessa, mutta on kuitenkin huomioitava, ettei langansyöttönopeus ole sama kuin hitsausnopeus. [1] Ionixin (2024) mukaan hitsausnopeus on tyypillisesti noin 80 % langansyöttönopeudesta [2]. Langansyötön mahdollistaman liikkeen avulla hitsaaja voi keskittyä lasersäteen suuntaamiseen sekä poltinkulman pitämiseen kuvan 11 mukaisesti [1].



**Kuva 11.** Käsilaserhitsauksen poltinkulma (Muokattu lähteestä [1])

Käsilaserhitsauksen suoritustekniikassa on huomioitava kuvassa 11 esitetyt heijastusvaarat [22]. Kuvan mukaan poltinkulman tulisi olla noin 30–70° vaakatasoon nähden. Pandey (2025) diplomityön kokeellisten tulosten perusteella lasersäteen kohtisuora tulokulma kappaleeseen mahdollistaa suurimman tunkeuman [48, s. 55]. Käsilaserhitsauksessa liian kohtisuora poltinkulma voi kuitenkin heijastaa lasersäteilyä haitallisesti käyttäjää kohti [1].

Käsilaserhitsauksessa langansyöttönopeus vaihtelee tyypillisesti 25–600 cm/min, ja lisäainelangan halkaisija on yleensä 0,6–1,6 mm. Hitsin geometriaa suunniteltaessa on huomioitava lisäainelangan halkaisija, sillä langan paksuus vaikuttaa suoraan hitsin suuruuteen. [44] Suurempi lisäainelanka voi myös mahdollistaa hitsauksen liitoksissa, joissa ilmarako on suurempi. Nyrkkisääntönä voidaan todeta, että kun ilmarako on enintään noin 80 % lisäainelangan halkaisijasta, liitos voidaan hitsata käsilaserilla. [2] Asikaisen (2025) mukaan railotoleransseihin voidaan vaikuttaa lisäainelangan halkaisijalla, ja nykyään on lisäksi mahdollista käyttää monilankasovelluksia [5, s. 13].

## 4. TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksen tuloksia sekä niiden merkitystä aiempien lukujen pohjalta. Tarkastelun tavoitteena on vastata tutkimuskysymyksiin ja arvioida tulosten luotettavuutta sekä niiden merkitystä työn kokonaisuuden kannalta. Luvun lopussa esitellään myös tutkimuksen aikana esiin nousseita jatkotutkimuskohteita.

Alaluvussa 4.1 esitellään ensimmäiseen tutkimuskysymykseen K1 liittyvät tulokset: ”Mitkä ovat käsilaserhitsauksen merkittävimmät hitsin laatuun vaikuttavat haasteet?” Luku tarkastelee keskeisiä hitsausprosessin haasteita ja niiden vaikutuksia hitsin laatuun. Alaluvussa 4.2 käsitellään toista tutkimuskysymystä K2: ”Miten käsilaserhitsauksen hitsausparametrit vaikuttavat hitsin laatuun?” Tässä luvussa tarkastellaan keskeisiä hitsausparametrejä ja analysoidaan tärkeimpien hitsausparametrien vaikutuksia hitsin laatuun. Alaluvussa 4.3 arvioidaan tutkimuksen tulosten merkitystä ja luotettavuutta suhteessa työn tavoitteisiin. Lopuksi esitetään myös jatkotutkimuskohteita, joita olisi hyödyllistä tutkia lisää.

### 4.1 Käsilaserhitsin laatuun vaikuttavat haasteet

Käsilaserhitsauksen (HLBW) keskeisin haaste on prosessin toistettavuus. Puoliautomaattisessa menetelmässä hitsaajan on kohdistettava hitsauspoltin käsin, mikä altistaa sulaan metalliin muodostuvan avaimenreiän häiriöille. Tulosten perusteella suoritustekniikan lisäksi hitsausparametrit vaikuttavat merkittävästi avaimenreiän vakauden hallintaan. Laatuvaatimuksia vaativat hitsit tulee suorittaa toistettavalla hitsausprosessilla hitsille asetettujen tiukkojen geometrinen sekä laadullisten rajojen puitteissa [15][16]. Epävakaat avaimenreikä voi aiheuttaa tunkeuman vaihtelua, roiskeisuutta ja heikentää tavoitellun muodon saavuttamista.

Tulosten perusteella huokoisuus on toinen merkittävä haaste laadukkaan hitsin toteuttamisessa. Huokoisuudella tarkoitetaan kaasukuplien jäämistä jähmettyvään hitsisulaan, mikä heikentää hitsatun liitoksen rakennetta. Alaluvun 2.5 tulosten perusteella hitsattavien kappaleiden epäpuhtaudet sekä epävakaan avaimenreiän seinämien romahtaminen voi aiheuttaa huokosten muodostumista hitsiin. Asikaisen (2025) mukaan syvä ja kapea käsilaserhitsin profiili altistaa sen epäpuhtauksien haitallisille vaikutuksille, kuten huokoisuudelle [5]. Alttius huokoisuuteen perustuu menetelmän nopeaan jäähtymiseen, jolloin syvälle hitsiin muodostunut kaasusulkeuma ei ehdi pois jähmettyvästä metallista [36].

Tutkimustulokset osoittivat, että käsilaserhitsaus muuttaa materiaalin mikrorakennetta tyypillisesti perusaineen rakennetta kovemmaksi ja hauraammaksi. Laserhitsauksessa lämpö kohdistuu pienelle alueelle, mikä voi Asikaisen (2025) mukaan johtaa nopean jäähtymisen seurauksena rakenteen karkenemiseen ja kuumahalkeilualttiuteen [5, s. 13]. Tulosten perusteella hitsausprosessin vaikutuksia mikrorakenteeseen ei voida suoraan yleistää, sillä ne riippuvat merkittävästi hitsatusta materiaalista.

Hitsattavien kappaleiden ilmaraon vaihtelu ja avaimenreiän epävakaus voivat aiheuttaa käsilaserhitsien vajoamista, riittämätöntä tunkeumaa ja liitosvirheitä. Laserhitsauksen kapean säteen vuoksi kappaleiden välinen ilmarako on pidettävä hyvin pienenä, jotta säde ei pääse kulkemaan niiden välistä [9, s. 23]. Tulosten perusteella suuren ilmaraon kannalta tarkoituksenmukaisesti säädetyt hitsausparametrit mahdollistavat hitsauksen myös pienellä 0–1,3 mm ilmaraolla [2]. Kapean lasersäteen vuoksi säteen suuntaus on myös tärkeää, jotta molemmat kappaleet sulavat tasaisesti [9, s. 25].

Kirjallisuuskatsauksen perusteella muodostuu kokonaiskuva siitä, miten laserhitsi muodostuu ja mitkä keskeiset haasteet siihen liittyvät. Tuloksista voidaan tunnistaa hitsausprosessin kannalta merkittävimmät haasteet (K1), jotka vaikuttavat suoraan hitsin laatuun. Käsilaserhitsauksen tärkeimmät laatuhaasteet liittyvät huokoisuuteen ja liitoksen geometrisiin vaatimuksiin. Haasteiden hallinta edellyttää avaimenreiän vakauden tavoittelua, sillä sen käyttäytyminen vaikuttaa suoraan toistettavuuteen ja laaturvirheisiin. Hitsausparametrien säädön tavoitteena on saavuttaa vakaa avaimenreikä, riittävä tunkeuma sekä varmistaa, että hitsi voidaan suorittaa liitoksen toleranssin mukaan. Kirjallisuudesta löytyi monipuolisesti laserhitsauksen haasteita käsitteleviä lähteitä, joten kokonaisuutena tuloksia voidaan pitää luotettavina. On kuitenkin huomioitava, että käsilaserhitsauksen haasteisiin liittyen on julkaistu toistaiseksi hyvin vähän empiirisiä tutkimuksia.

## **4.2 Hitsausparametrien vaikutus käsilaserhitsin laatuun**

Tutkimustulosten perusteella käsilaserhitsauksen suorittaminen edellyttää menetelmän ja säädettävien hitsausparametrien hyvää tuntemusta. Työssä tarkasteltiin käsilaserhitsauksen keskeisiä hitsausparametrejä ja niiden vaikutusta hitsin laatuun. Luvun 3 tulokset osoittavat, että säädettävien parametrien lisäksi myös laitekohtaiset erot vaikuttavat hitsaustulokseen. Lasersäteen polttopisteen koko voi vaihdella hitsauspolttimen rakenteen ja optisen kuidun halkaisijan mukaan, mikä on huomioitavaa, sillä samoin hitsausparametrein tehdyt liitokset voivat eri laitteilla poiketa toisistaan. Luvun 3 perusteella voidaan esittää tärkeimmät säätöparametrit, joilla käsilaserhitsauksen laatua voidaan hallita:

1. Laserin teho
2. Tasainen hitsauspolttimen kuljettaminen ja hitsausnopeus
3. Suojakaasun tyyppi ja virtausnopeus
4. Vaaputuksen amplitudi ja taajuus
5. Polttopisteen hienosäätö
6. Lisäainelangan syöttönopeus ja materiaaliin soveltuva lisäaine
7. Poltinkulma

Tunkeumaan vaikuttavien hitsausparametrien säätö on keskeisin osa hitsausparametrien säätöä, sillä niiden avulla määritetään hitsin vaadittava geometria. Tunkeuman suuruuteen vaikuttavat erityisesti laserteho ja hitsausnopeus, mutta myös poltinkulma, lasersäteen vaaputus sekä polttopisteen hienosäätö. Tulosten perusteella polttopisteen negatiivinen tarkennus kasvattaa tunkeumaa siirtämällä polttopistettä syvemmälle materiaaliin. Myös poltinkulma eli lasersäteen tulokulma suhteessa kappaleeseen vaikuttaa tunkeumaa.

### **Hitsausparametrien vaikutus hitsausprosessin toistettavuuteen**

Tutkimuskysymyksen K1 tulosten perusteella avaimenreiän hallinta on keskeisessä roolissa käsilaserhitsauksen toistettavuuden kannalta. Avaimenreiän vakauteen vaikuttavat useat luvun alussa luetellut hitsausparametrit. Asikaisen (2025) mukaan liian suuri laserteho tai suhteessa liian hidas hitsausnopeus voivat aiheuttaa avaimenreiän epävakautta [5]. Lisäksi hitsattavien liitosten ilmaraon pienentäminen voi parantaa avaimenreiän vakautta. Artikkelissa ilmaraon vaikutusmekanismia avaimenreiän vakauteen ei kuitenkaan käsitelty yksityiskohtaisesti [5].

Alaluvun 3.3 tulosten perusteella myös suojakaasulla on merkittävä vaikutus hitsausprosessin toistettavuuteen. Suojakaasun tehtävänä on syrjäyttää haitalliset kaasut sulan ympäriltä sekä vakauttaa avaimenreikää poistamalla hitsauksessa syntyvää plasmapiilveä. Tulokset osoittavat, että suojakaasun tiheys ja lämmönjohtavuus vaikuttavat plasmapiilven käyttäytymiseen. Elmer et al. (2014) mukaan tiheimmät kaasut, kuten typpi ja argon, syrjäyttävät plasmapiilveä tehokkaammin kuin helium [45]. Suojakaasun tyyppin lisäksi myös sen virtausnopeus vaikuttaa merkittävästi hitsausprosessin toistettavuuteen. Liian suuri suojakaasun virtausnopeus voi muuttaa virtauksen turbulentiksi. Turbulentti virtaus on ongelmallista, koska se aiheuttaa suojakaasun sekoittumista ympäröivään ilmaan muodostaen pyörteitä. Pyörteet puolestaan lisäävät hitsatun rakenteen huokoisuutta ja roiskeisuutta.

Myös lasersäteen polttopisteen hienosäädöllä voidaan vaikuttaa avaimenreiän toistettavuuteen. Volpp ja Vollertsen (2016a) mukaan polttopisteen sijoittaminen hieman materiaalin pinnan alapuolelle (esim.  $Z_f = -2$  mm) pienentää avaimenreiän värähtelyä ja parantaa hitsausprosessin toistettavuutta [14, s. 449–452].

### **Hitsausparametrien vaikutus hitsin mikrorakenteeseen**

K1-tulosten perusteella käsilaserhitsin mikrorakenteen karkeneminen ja kuumahalkeilualttius voivat muodostua merkittäväksi ongelmaksi. Asikaisen (2025) mukaan mikrorakenteeseen voidaan vaikuttaa pienentämällä hitsausnopeutta, lisäämällä tehoa tai hyödyntämällä säteen optista vaaputusta, jolloin lämmöntuonti jakautuu laajemmalle alueelle [5, s. 13]. Alaluvun 3.2 mukaan myös vaaputuksen taajuus vaikuttaa lämpövaikutusalueen kokoon; tutkimuksen perusteella 100 Hz vaaputus on edullisempi kuin 50 Hz, kun tavoitteena on minimoida lämpövaikutusalue [44]. Käsilaserhitsauksen etuna on kuitenkin sen pieni ja paikallinen lämmöntuonti, joten hitsausparametrien säätäminen lämmöntuontia lisäävään suuntaan voi heikentää menetelmän etuja, kuten levyjen vähäistä vetelevyyttä. Luvun 3.2 tulosten perusteella myös lisäainelangan laadun avulla voidaan vaikuttaa hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten kovuuteen ja myötölujuuteen.

### **Hitsausparametrien vaikutus hitsin huokoisuuteen**

K1-tulosten perusteella avaimenreiän vakaus ja epäpuhtaudet ovat merkittävimpiä käsilaserhitsauksen huokoisuutta lisääviä tekijöitä. Myös suojakaasun valinnalla on huomattava vaikutus kaasusulkeumien eli huokosten jäämiseen hitsiin. Alaluvun 3.3 tulokset osoittavat, että typen käyttö suojakaasuna vähentää huokoisuutta ruostumattoman teräksen hitsauksessa. Kuvasta 10 havaitaan selkeä ero argonin ja typen vaikutuksesta huokoisuuden muodostumiseen. Elmer et al. (2014) esittävät, että typen (aktiivinen kaasu) reagoidessa metallin seosaineiden kanssa hitsisula muuttuu juoksevammaksi, mikä edistää huokosten poistumista [45]. Suojakaasun valintaa ei kuitenkaan voida yleistää, vaan se tulee huomioida materiaalienkohtaisesti. Alaluvun 3.3 tulosten mukaan suojakaasun turbulenssi lisää myös huokoisuutta, joten suojakaasun virtausnopeudessa tulisi pyrkiä laminaariseen virtaukseen. Tulosten perusteella huokoisuutta voidaan vähentää myös lisäämällä vaaputusta ja lämmöntuontia. Hitsisulan virtauksen lisääminen antaa kaasusulkeumille enemmän aikaa poistua hitsistä.

### **Hitsausparametrien vaikutus hitsattavien railojen toleransseihin**

Alaluvun 3.2 tulosten perusteella hitsattavien railojen toleransseihin voidaan vaikuttaa tehokkaimmin vaaputuksen avulla. Vaaputuksen amplitudia muuttamalla säädetään, kuinka leveälle alueelle edestakaisin vaaputtava lasersäde liikkuu. Amplitudin

kasvattaminen vähentää tunkeumaa, koska lämpöenergia jakautuu laajemmalle alueelle. Riittävä tunkeuma saavutetaan nostamalla samaan aikaan tehoa tai laskemalla hitsausnopeutta. Leveän vaaputuksen avulla voidaan myös vähentää kohdistusvirheitä, koska säteen ei tarvitse osua yhtä tarkasti kapealle alueelle. Liitostyyppin valinnassa voi suosia limiliitosta, sillä päällekkäin asetettavat levyt eivät ole alttiita toleranssivaatimuksille [22].

### **Hitsausparametrien vaikutusten kokonaiskuva**

Tulosten perusteella voidaan muodostaa kokonaiskuva siitä, miten käsilaserhitsausprosessin hitsausparametrit vaikuttavat hitsin laatuun. Keskeisiä tekijöitä ovat lasertehon ja hitsausnopeuden välinen suhde sekä toistettava suoritustekniikka, joiden avulla saavutetaan tavoiteltu tunkeuma. Toistettavan hitsin edellytyksenä on avaimenreiän vakaus, jolloin hitsiin ei muodostu liiallista huokoisuutta, tunkeuma pysyy tasaisena eikä metalliroiskeisuutta synny liiallisesti. Koska hitsausparametrien vaikutukset ovat laite- ja materiaalikohtaisia, tulosten kriittinen tarkastelu on välttämätöntä. Työn merkittävimpänä yksittäisenä tutkimustuloksena voidaan pitää argonin ja typen eroa huokoisuuteen suojakaasuna. Nykyinen käsitys suojakaasujen vaikutuksista käsilaserhitsauksessa on kuitenkin osin epäselvä ja edellyttää lisää tutkimusta.

### **4.3 Tulosten luotettavuus ja jatkotutkimuskohteet**

Tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa on huomioitava, että käsilaserhitsaus on vielä varsin uusi hitsausmenetelmä. Tämä käy ilmi esimerkiksi laserhitsauksen laadunhallintaa koskevasta standardista SFS-EN 1011-5:2018, jossa käsilaserhitsauksen haasteena mainitaan sen epäkäytännöllisyys. Väite on ristiriidassa kesän 2025 IIW-konferenssissa esiteltyjen tutkimusten kanssa, joiden mukaan käsilaserhitsaus on helposti opittava ja monipuolinen hitsausmenetelmä [22][23]. Standardin SFS-EN 1011-5:2018 väitettä käsilaserhitsauksen epäkäytännöllisyydestä tukevat kuitenkin laserhitsauksessa vaadittavat turvallisuustoimet, jotka on otettava vakavasti [22].

Työn tulokset perustuvat sekä käsilaserhitsauksen että mekanisoidun laserhitsauksen lähteisiin. Näiden kahden prosessin pääasiallinen ero on siinä, että toisessa hitsauspäättä ohjaa ihminen ja toisessa sitä ohjaa mekanisoitu laite. Molempien hitsausprosessien perusmekanismit ovat samat, minkä vuoksi monet tässä työssä käytetyt lähteet soveltuvat vain yksinkertaistetusti molempiin menetelmiin. On syytä huomioida, että manuaalisesti suoritettu käsilaserhitsaus sisältää todennäköisemmin

enemmän virheitä, sillä ihminen saattaa tehdä helpommin spontaaneja liikkeitä ja kohdistusvirheitä. Menetelmien erojen takia käsilaserhitsauksen hyötysuhteeseen liittyvät tiedot ovat kirjallisuudessa puutteellisia, mikä rajoittaa sen lämmöntuonnin arvioimista.

Valtaosa työn lähteistä koostuu vertaisarvioituista tieteellisistä artikkeleista. Aineistoon sisältyy myös muutamia oppikirjoja, toimialan tärkeän instituution IIW-konferenssin tiedostoja, Hitsaus Tekniikka -lehden artikkeli sekä hitsauslaitevalmistaja Kempin asiantuntemusta prosessiin liittyen. Lähteiden kokonaisuutta voidaan pitää luotettavana, mutta erityisesti manuaalisesti suoritettavaan laserhitsaukseen olisi ollut hyödyllistä löytää lisää empiirisiä tutkimuksia. Yhteenvedona voidaan todeta, että työn tuloksia voidaan pitää luotettavina, vaikka käsilaserhitsauksessa onkin edelleen paljon tutkittavaa.

Käsilaserhitsauksessa on selkeä tarve sovellus- ja materiaali kohtaisille empiirisille tutkimuksille. Kirjallisuuskatsauksen perusteella ei löytynyt tutkimustietoa siitä, miten juuri käsilaserhitsauksessa voidaan vaikuttaa avaimenreiän vakauttamiseen. Forstevargin ja Akhtarin (2025) mukaan prosessin toteutusta tulisi tutkia laajemmin eri materiaaleilla ja liitostyypeillä, jotta saataisiin tarkempaa tietoa materiaalikohtaisista ilmiöistä [49]. Heidän mukaansa tarvitaan myös tutkimusta puhdistuksen vaikutuksesta hitsin laatuun, eli siitä, kuinka suuri merkitys hitsausprosessin puhtaudella on laaturvirheiden syntyyn. Asikainen (2025) ehdottaa lisäksi tekoälyn tutkimista hitsausparametrien säädössä ja hitsausprosessin valvonnassa [5, s. 13]. Hitsausparametrien jatkuva mittaus voisi mahdollistaa hitsausprosessin säätämisen reaaliajassa.

## 5. YHTEENVETO

Käsilaserhitsaus on laserteknologiaa hyödyntävä sulahitsausmenetelmä, jolla voidaan valmistaa kapeita ja syvän tunkeuman omaavia hitsejä. Erityisesti hitsausmenetelmän pieni lämmöntuonti ja suuri hitsausnopeus tekevät siitä varteenotettavan vaihtoehdon perinteisille kaarihitsausmenetelmille. Työn tarkoituksena oli kuvailevan kirjallisuuskatsauksen avulla määrittää käsilaserhitsauksen (HLBW, engl. Hand-held Laser Beam Welding) keskeiset hitsausominaisuudet, tunnistaa haasteet sekä tarkastella hitsausparametrien vaikutusta hitsin laatuun. Työssä pyrittiin vastaamaan kysymyksiin ”Mitkä ovat käsilaserhitsauksen merkittävimmät hitsin laatuun vaikuttavat haasteet?” ja ”Miten käsilaserhitsauksen hitsausparametrit vaikuttavat hitsin laatuun?”

Laserhitsauksen edut ja haasteet perustuvat avaimenreikäilmiöön, jossa lasersäde sulattaa ja höyrystää työstettävää kappaletta. Metallin voimakas höyrystyminen aiheuttaa paineen, jonka seurauksena sulaan hitsiin muodostuu syvä ja kapea kuoppa. Kappaleeseen muodostuneen kuopan kautta lasersäde pääsee tunkeutumaan yhä syvemmälle materiaaliin mahdollistaen syvän ja kapean hitsin. Tutkimustulosten perusteella avaimenreiän hallitseminen on menetelmän tärkein yksittäinen ominaisuus, sillä se vaikuttaa lukuisiin hitsausprosessin haasteisiin.

Hitsausmenetelmän toistettavuus riippuu keskeisesti avaimenreiän hallinnasta. Laatuvaatimuksia vaativat hitsit on toteutettava geometristen ja laadullisten rajojen puitteissa. Epävakaata avaimenreikää aiheuttaa tunkeuman vaihtelua, roiskeisuutta ja vaikeuttaa tavoitellun muodon saavuttamista. Avaimenreiän vakauteen vaikuttavat suoritustekniikka, laserteho ja hitsausnopeuden suhde, suojakaasun valinta ja virtausnopeus, vaaputuksen parametrit sekä liitoksen ilmarako. Avaimenreiän vakaus perustuu siihen vaikuttavien voimien tasapainottamiseen.

Toinen käsilaserhitsauksen olennainen haaste on siihen muodostuva huokoisuus. Menetelmän huokoisuusalttius liittyy sekä avaimenreiän vakauteen että menetelmän edellyttämään puhtauteen. Käsilaserhitsauksen syvä ja kapea hitsin geometria altistaa liitoksen epäpuhtauksien vaikutuksille, koska nopeasti jäähtyvistä hitsistä kaasusulkeumat ja muut epäpuhtaudet eivät ehdi poistua riittävän nopeasti. Tulosten perusteella suojakaasun valinnalla oli huomattava vaikutus huokosten jäämiseen hitsiin. Suojakaasun valinta tulee tehdä aina materiaalikohtaisesti, mutta esimerkiksi ruostumattoman teräksen hitsauksessa tyypin käyttö argonin sijasta vähensi huokosten määrää merkittävästi.

Käsilaserhitsauksen kapean säteen vuoksi hitsattavien kappaleiden liitostoleranssien tulee olla riittävän pienet. Hitsattavien kappaleiden ilmaraon vaihtelu voi aiheuttaa käsilaserhitsin vajoamista, riittämätöntä tunkeumaa ja liitosvirheitä. Tulosten perusteella suurille ilmaraoille säädetyt hitsausparametrit mahdollistavat hitsauksen 0–1,3 mm ilmaraolla. Tehokkaimmin kappaleiden ilmarakojen muutoksiin voidaan vaikuttaa vaaputuksen avulla. Edestakaisin liikkuvan vaaputuksen amplitudia kasvattamalla lasersäde kohdistuu laajemmalle alueelle, jolloin myös suuremmat ilmarat ovat hitsattavissa. Kappaleiden ilmaraosta johtuviin haasteisiin voidaan vaikuttaa myös liitostyyppin valinnalla. Tulosten perusteella laserhitsauksessa kannattaa suosia limiliitosta, sillä päällekkäin asetettavat levyt eivät ole alttiita toleranssivaatimuksille.

Tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa on huomioitava, että käsilaserhitsaus on vielä varsin uusi hitsausmenetelmä. Lähdeaineisto koostuu sekä käsilaserhitsauksen, että mekanisoidun laserhitsauksen tutkimuksista. Molempien hitsausprosessien perusmekanismeja voidaan pitää samoina, minkä vuoksi monet tässä työssä käytetyt lähteet soveltuvat vain yksinkertaistetusti molempiin menetelmiin. On syytä huomioida, että manuaalisesti suoritettu käsilaserhitsaus sisältää todennäköisesti enemmän virheitä, sillä ihmisen ohjaama hitsauspoltin ei liiku tasaisesti. Tutkimustuloksia voidaan pitää kokonaisuudessaan luotettavina, mutta käsilaserhitsauksessa on selkeä tarve sovelluskohtaisille empiirisille tutkimuksille. Tulosten perusteella käsilaserhitsauksen tutkimusta tarvittaisiin laajemmin eri materiaaleille, liitostyypeille sekä siihen kuinka avaimenreiän epävakautta voitaisiin vähentää juuri manuaalisesti suoritettussa käsilaserhitsausprosessissa.

# LÄHTEET

- [1] Kemppi Oy, Welding equipment and software, Hitsausmateriaalit
- [2] I. Lappalainen, V. Rinne, Käsilaserhitsaus lyhyesti, ionix, (2025). Saatavissa (viitattu 31.10.2025): <https://www.ionix.fi/kasilaserhitsaus/>
- [3] A. Pfaller, Setting the standard for Handheld Laser Welding, American Welding Society, (2024). Saatavissa (viitattu 19.9.2025): <https://www.aws.org/magazines-and-media/welding-digest/wd-dec-24-setting-the-standard-for-handheld-laser-welding/>
- [4] T. Sipola, Hitsaajista on pula, eikä koulutus vastaa teollisuuden tarpeita – hitsausta kokeillut lukiolainen: ”Nykyuorisolla on fyysinen työ jäänyt vähiin”, Yle metalliteollisuus, (2022). Saatavissa (viitattu 29.10.2025): <https://yle.fi/a/3-12277539>
- [5] J. Asikainen, Laatus valon voimalla: Laadunvarmistus laserhitsauksessa, Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys SHY ry, Hitsaus Tekniikka, Vol.77, No.3, (2025), s.12–14. Saatavissa (viitattu 29.10.2025): <https://www.lehtiluukku.fi/lehdet/hitsaustekniikka/3-2025/421197.html>
- [6] M. Kangasniemi, K. Utriainen, S. M. Ahonen, A. M. Pietilä, P. Jääskeläinen, E. Liikanen, Kuvaileva kirjallisuuskatsaus: eteneminen tutkimuskysymyksestä jäsenettyyn tietoon/Narrative literature review: from a research question to structured knowledge, Hoitotiede, no. 4, (2013). Saatavissa (viitattu 20.9.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_proquest\\_journals\\_1469873650](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_proquest_journals_1469873650)
- [7] E. Assuncao, S. Williams, D. Yapp, Interaction Time and Beam Diameter Effects on the Conduction Mode Limit, Optics and laser in Engineering, Vol.50, (2012), p. 823–828. Saatavissa (viitattu 23.9.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_webofscience\\_primary\\_000302044300002CitationCount](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_webofscience_primary_000302044300002CitationCount)
- [8] I. Bitharas, N.A. McPherson, W. McGhie, D. Roy, A.J. Moore, Visualisation and optimization of shielding gas coverage during gas metal arc welding, Journal of materials processing technology, vol.255, (2018), p. 451–462. Saatavissa (viitattu 23.9.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_webofscience\\_primary\\_000431837700046](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_webofscience_primary_000431837700046)
- [9] M. Hietala, M. Keskitalo, T. Jokelainen, K. Mäntyjärvi, Laserhitsauskäsikirja, Oulun yliopisto, (2018). Saatavissa (viitattu 24.9.2025): [https://www oulu.fi/fmt/publications/Laserhitsausk%C3%A4sikirja\\_M\\_Hietala\\_et\\_al\\_2018.pdf](https://www oulu.fi/fmt/publications/Laserhitsausk%C3%A4sikirja_M_Hietala_et_al_2018.pdf)
- [10] V. Kujanpää, A. Salminen, J. Vihinen, Lasertyöstö. Teknologiainfo Teknova, (2005). Saatavissa (viitattu 24.9.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma991787025305973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma991787025305973)

- [11] W. M. Steen, J. Mazumber, *Laser Material Processing*, Springer London, 4 th ed. (2010). Saatavissa (viitattu 28.9.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1kfmqvo/alma9910614562605973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1kfmqvo/alma9910614562605973)
- [12] J. Svenungsson, I. Choquet, A. Kaplan, *Laser Welding Process – A Review of Keyhole Welding Modelling*, *Physics Procedia*, vol. 78, (2015), p. 182–191. Saatavissa (viitattu 24.9.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_swepub\\_primary\\_oai\\_DiVA\\_org\\_ltu\\_39514](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_swepub_primary_oai_DiVA_org_ltu_39514)
- [13] S. F. Nabavi, A. Farshidianfar, H. Dalir, A comprehensive review on recent laser beam welding process: geometrical, metallurgical, and mechanical characteristics modeling, *international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 129, (2023). Saatavissa (viitattu 28.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_springer\\_journals\\_10\\_1007\\_s00170\\_023\\_12536\\_1](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_springer_journals_10_1007_s00170_023_12536_1)
- [14] J. Volpp, F. Vollertsen, Keyhole stability during laser welding–part I: modeling and evaluation, *Production Engineering Research and Development*, Vol. 10, (2016), 443–457 p. Saatavissa (viitattu 22.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_swepub\\_primary\\_oai\\_DiVA\\_org\\_ltu\\_72399](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_swepub_primary_oai_DiVA_org_ltu_72399)
- [15] SFS-EN ISO 13919-2:2021, Electron and laser-beam welded joints. Requirements and recommendations on quality levels for imperfections. Part 2: Aluminium, magnesium and their alloys and pure copper, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2021)
- [16] SFS-EN ISO 13919-1:2019, Electron and laser-beam welded joints. Requirements and recommendations on quality levels for imperfections. Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2019)
- [17] Y. Kang, Y. Zhao, Y. Li, J. Wang, X. Zhan, Simulation of effect of keyhole Instability on Porosity during the Deep Penetration Laser Welding Process, *Metals*, Vol. 12, (2022). Saatavissa (viitattu 22.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_doaj\\_primary\\_oai\\_doaj\\_org\\_article\\_ae44701081a549a6b2d29eef0af7591c](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_doaj_primary_oai_doaj_org_article_ae44701081a549a6b2d29eef0af7591c)
- [18] S. Stenhoff, J. Mills, *Basic Principles of Lasers*, *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, Vol. 25, no. 2, (2024), p. 133–137. Saatavissa (viitattu 28.9.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_crossref\\_primary\\_10\\_1016\\_j\\_mpaic\\_2023\\_10\\_013](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_crossref_primary_10_1016_j_mpaic_2023_10_013)
- [19] C. Chang-Qing, W. Ting, Z. Xiao-Dong, Z. Xiao-Bing, C. Kun, F. Zhe-Jun, The Analysis of Divergence Angle of Collimated Beams, *Optik (Stuttgart)*, Vol. 135, (2017), p. 305–307. Saatavissa (viitattu 30.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_crossref\\_citationtrail\\_10\\_1016\\_j\\_ijleo\\_2017\\_01\\_095](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_crossref_citationtrail_10_1016_j_ijleo_2017_01_095)
- [20] SFS-EN 1011-6:2018, *Welding. Recommendation for welding of metallic materials. Part 6: Laser beam welding*, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2018)

- [21] S. Katayama, Fundamentals of Laser-Materials Interaction and Peripheral Optical System, Springer Nature, (2020). Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_proquest\\_ebookcentralchapters\\_6363162\\_16\\_28](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_proquest_ebookcentralchapters_6363162_16_28)
- [22] D. Hamre, P. W. Hochanadel, S. Jahn, P. Mendez, M. Nentwich, D. Werba, Considerations about Handheld Laser Beam Welding (HLBW), IIW, The International Institute of Welding, (2025). Saatavissa (viitattu 24.9.2025): <https://www.steel.org.au/getattachment/5be2a91e-282d-47ce-b2e4-557d57f6b9d0/HHLW-BP-fin.pdf>
- [23] J. Alvarez Rocha, P. Mendez, I. Pigozzo, D. Hamre, F. Castro, 1705: Advancements in handheld laser welding (HH LBW) for multi-pass butt joint applications, Presented at: 78<sup>th</sup> IIW Annual Assembly and International Conference, Genoa, Italy, (2025). Saatavissa (viitattu 21.10.2025): <https://iiw2025.com/wp-content/uploads/2025/05/IV-2.pdf>
- [24] V. M. Mansur, R. A. de F. Mansur, S. M. de Carvalho, R. H. M. de Siqueira, M. S. F. de Lima, Effect of laser welding on microstructure and mechanical behaviour of dual phase 600 steel sheets, Heliyon vol. 7, (2021). Saatavissa (viitattu 25.9.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_scopus\\_primary\\_2\\_s\\_2\\_0\\_85121329547](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_scopus_primary_2_s_2_0_85121329547)
- [25] ASTM E340-23 Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys, (2023). Saatavissa (viitattu 30.10.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_astm\\_standards\\_116676](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_astm_standards_116676)
- [26] S. Němeček, T. Mužík, M. Mišek, Differences between Laser and Arc Welding of HSS Steels, Physics Procedia, Vol. 39, (2012), p. 67-74. Saatavissa (viitattu 25.11.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_elsevier\\_sciencedirect\\_doi\\_10\\_1016\\_j\\_phpro\\_2012\\_10\\_015](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_elsevier_sciencedirect_doi_10_1016_j_phpro_2012_10_015)
- [27] Z. Boumerzoug, Heat Affected Zone in Welded Metallic Materials, Modern Concepts in Material Science, Vol. 3, no. 4, (2020). Saatavissa (viitattu 2.11.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_crossref\\_primary\\_10\\_33552\\_MCMS\\_2020\\_03\\_000566](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_crossref_primary_10_33552_MCMS_2020_03_000566)
- [28] H. Yang, J. Chen, X. Zhao, N. Huda, A. P. Gerlich, Effect of Filler Wire Composition on Weld Metal Microstructure and Mechanical Properties in X80 Steel Laser Welds, Materials, Vol. 17, (2024), p.5236. Saatavissa (viitattu 24.11.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_pubmed\\_primary\\_39517512](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_pubmed_primary_39517512)
- [29] SFS-EN ISO 15609-4:2009, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Part 4: Laser beam welding, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2009)
- [30] SFS-käsikirja 66-14:2024, Welding. Part 14: Laser Welding, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2024)

- [31] SFS-EN ISO 15614-11:2002, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Part 11: Electron and laser beam welding, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2002)
- [32] SFS-EN 15614-1:2017, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys, (Corrected version 2017-10-01), Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2017)
- [33] SFS-EN ISO 6520-1, Hitsaus ja lähiprosessit. Geometrinen hitsausvirheiden luokittelu metallisissa materiaaleissa. Osa 1: sulahitsaus, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2008)
- [34] F. Tenner, C. Brock, F. Klämpfl, M. Schmidt, Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry, *Optics and lasers in engineering*, Vol. 64, (2015), 32-41 p. Saatavissa (viitattu 23.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_elsevier\\_sciencedirect\\_doi\\_10\\_1016\\_j\\_optlaseng\\_2014\\_07\\_009](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_elsevier_sciencedirect_doi_10_1016_j_optlaseng_2014_07_009)
- [35] J. Volpp, Keyhole stability during laser welding—part II: process pores and spatters, *Production engineering*, Vol. 11, (2016), 9-18 p. Saatavissa (viitattu 23.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_scopus\\_primary\\_2\\_s\\_2\\_0\\_84997106990](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_scopus_primary_2_s_2_0_84997106990)
- [36] D. Wu, X. Hua, L. Huang, F. Li, Y. Cai, Elucidation of keyhole induced bubble formation mechanism in fiber laser welding of low carbon steel, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 127, (2018), 1077-1086 p. Saatavissa (viitattu 23.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_crossref\\_primary\\_10\\_1016\\_j\\_ijheatmasstransfer\\_2018\\_07\\_107](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_crossref_primary_10_1016_j_ijheatmasstransfer_2018_07_107)
- [37] A. Z. Kenéz, T. Földes, É. Lublóy, Effect of surface cleaning on seam quality of laser beam welded mixed joints, *Case Studies in Construction Materials*, Vol.18, (2023). Saatavissa (viitattu 14.11.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_doaj\\_primary\\_oai\\_doi\\_org\\_article\\_dee59f6b62f74a62be3fa9f7b4ee1dad](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_doaj_primary_oai_doi_org_article_dee59f6b62f74a62be3fa9f7b4ee1dad)
- [38] SFS 3052:2020, Hitsaussanasto. Yleistermi, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, (2020)
- [39] K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, M. S. J. Hashmi, Effect of laser-welding parameters on the heat input and weld-bead profile, *Journal of materials processing technology*, Vol. 164, (2005), 978-985 p. Saatavissa (viitattu 31.10.2025):  
[https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_scopus\\_primary\\_2\\_s\\_2\\_0\\_17844369455](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_scopus_primary_2_s_2_0_17844369455)
- [40] M. Xiangmeng, P. Stephen Nugraha, B. Marcel, R. Michael, Parametric study of the laser energy absorption in high-power laser beam welding, Vol. 36, no. 3, (2024). Saatavissa (viitattu 1.10.2025):  
<https://pubs.aip.org/lia/jla/article/36/3/032026/3307776/Parametric-study-of-the-laser-energy-absorption-in>

- [41] A. S. Salminen, Effect of welding parameters on the efficiency and energy distribution during laser welding with filler wire, 20<sup>th</sup> International Congress on ICALEO 2001: Applications of Lasers & Electro-Optics Jacksonville, FL USA, (2001), 409-418 p. Saatavissa (viitattu 10.1.2025): [https://www.researchgate.net/publication/292229585\\_Effect\\_of\\_welding\\_parameters\\_on\\_the\\_efficiency\\_and\\_energy\\_distribution\\_during\\_laser\\_welding\\_with\\_filler\\_wire](https://www.researchgate.net/publication/292229585_Effect_of_welding_parameters_on_the_efficiency_and_energy_distribution_during_laser_welding_with_filler_wire)
- [42] Kemppe, K2 Lazer 3000, Operating manual – EN
- [43] J. D. Mullett, G. Dearden, R. Dodd, A. T. Shenton, G. Triantos, K. G. Watkins, A comparative study of optical fibre types for application in a laser-induced ignition system, Journal of optics. A, Pure and applied optics, Vol. 11, (2009). Saatavissa (viitattu 1.10.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_proquest\\_miscellaneous\\_34560589](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_proquest_miscellaneous_34560589)
- [44] C. Cox, Optimizing Handheld Laser Welding: Analyzing the Effects of Laser Power and Wobble Optic Parameters, The Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio, USA. Presented at: 78<sup>th</sup> IIW Annual Assembly and International Conference, Genoa, Italy, (2025). Saatavissa (viitattu 21.10.2025): <https://iiw2025.com/wp-content/uploads/2025/05/IV-2.pdf>
- [45] J. W. Elmer, J. Vaja, R. Pong, T.H. Gooch, H. D. Barth, The Effect of Ar and N<sub>2</sub> Shielding Gas on Laser Weld Porosity in Steel, Stainless Steel, and Nickel, Welding journal, No. 10, (2014). Saatavissa (viitattu 23.10.2025): <https://www.osti.gov/servlets/purl/1812143>
- [46] Denaliweld, Shielding Gas for Laser Welding: The Ultimate Guide <https://denaliweld.com/shielding-gas-for-laser-welding/>
- [47] M. Dreher, U. Füssel, S. Rose, M. Häßler, M. Hertel, M. Schnick, Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW, Welding in the world, Vol.57, (2013), 391-410 p. Saatavissa (viitattu 3.11.2025): [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_crossref\\_citationtrail\\_10\\_1007\\_s40194\\_013\\_0038\\_2](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_crossref_citationtrail_10_1007_s40194_013_0038_2)
- [48] K. Pandey, The effect of tilting angle on penetration depth and profile in laser welding and in submerged arc welding, Master's thesis, LUT University, (2019). Saatavissa (viitattu 24.11.2025): <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019112143509>
- [49] J. Frostenvarg, F. Akhtar, Hand held laser welding investigation on process mechanisms and recommendations for joining various materials suitable for storage hydrogen storage solutions and lightweight structures, Presented at: 78<sup>th</sup> IIW Annual Assembly and International Conference, Genoa, Italy, (2025). Saatavissa (viitattu 21.10.2025): <https://iiw2025.com/wp-content/uploads/2025/05/IV-2.pdf>