

Henry Aapro

SIMULOINNIN HYÖDYNTÄMINEN HITSAUSMUODONMUUTOSTEN MINIMOINNISSA AUTOMATISOIDUSSA T-PROFIILIN HITSAUSJÄRJESTELMÄSSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Helmikuu 2019

TIIVISTELMÄ

HENRY AAPRO: Simuloinnin hyödyntäminen hitsausmuodonmuutosten minimoinnissa automatisoidussa T-profiilin hitsausjärjestelmässä

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 78 sivua, 0 liitesivua

Helmikuu 2019

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sovellettu mekaniikka ja lämpötekniikka

Tarkastaja: apulaisprofessori Sami Pajunen, professori Reijo Kouhia

Avainsanat: Hitsausmuodonmuutos, jäännösjännitys, simulointi, FEM

Tämä työ käsittelee hitsaamisprosessin seurauksena hitsattavaan kappaleeseen syntyviä muodonmuutoksia sekä jäännösjännityksiä. Muodonmuutokset ja jäännösjännitykset syntyvät kappaleen epätasaisen lämpenemisen ja jäähtymisen johdosta. Pysyvien muodonmuutosten pääasiallisia aiheuttajia ovat kappaleeseen epätasaisen lämpenemisen ja jäähtymisen seurauksena syntyvät paikalliset plastiset venymät.

Yleisesti käytetyt menetelmät hitsausmuodonmuutosten hallitsemiseksi ovat pääosin mekaanisen tai termisen prosessin välityksellä kappaleeseen aiheutettuja voimia, jotka piehentävät jäännösjännityksiä. Suurinta osaa käytetyistä menetelmistä sovelletaan ennen tai jälkeen varsinaisen hitsaamisen, mikä lisää kappaleiden valmistusaikaa ja -kustannuksia. Lisäksi oikaisutoimenpiteiden toteutus vaatii työntekijältä asiantuntemusta ja kokemusta muodonmuutosten hallinnasta.

Muodonmuutoksia voidaan hallita hitsauksen aikana lämmittämällä toista tai molempia yhteen hitsattavista kappaleista lokaalisti siten, että esilämmityksen aiheuttama deformaatio kompensoi hitsauksen aiheuttamaa deformaatiota. Esilämmityksen sijainnin ja tehon valinta on haasteellinen tehtävä, johon voidaan käyttää apukeinona simulointia.

Työn pääpaino on T-palkkiin syntyvien muodonmuutosten määrittäminen sitä hitsattaessa. Simuloinnin avulla voidaan määrittää sopivat hitsaus- ja esilämmitysparametrit muodonmuutosten minimoimiseksi ilman hitsaustestien materiaalihävikkiä. Työssä esitellään hitsausmuodonmuutosten yksityiskohtaisen simuloinnin proseduuri ja vastaavuus hitsaustesteillä saatuihin mittaustuloksiin. Simulaatiomallissa otetaan huomioon lämmöntuonti kappaleisiin ajasta riippuvana ja kaikki materiaaliominaisuudet lämpötilariippuvina. Huomioon otetaan hitsausparametrit, materiaaliparametrit, geometria sekä mahdollinen esilämmitys uumassa ja/tai laipassa.

Sekundaarinen tavoite on simuloinnin hyödyntämisen mielekkyyden, tarkkuuden ja sovelluskohteiden selvittäminen hitsausmuodonmuutoksien hallitsemisessa. Edellä mainittujen mallien lisäksi esitetään elastisen jäännösvenymäanalyysin toimintaperiaate ja sovelluskohteet. Yksinkertaistetussa elastisessa mallissa lasketaan kappaleen plastiset venymät ja venymäalueet, joiden oletetaan yksin olevan vastuussa hitsausmuodonmuutoksista. Malli on hyvä apuväline suurien rakenteiden muodonmuutosten simuloinnissa. Se vaatii taustalleen yksityiskohtaisen simulaatiomallin ratkaisun, mutta menetelmän etuna on se, että se tarvitsee ratkaista vain kerran yhdelle liitokselle. Ratkaisuna saadut venymät ja venymäalueet voidaan sen jälkeen siirtää alkuehtona suuremman rakenteen elastisen FE-mallin kaikkiin liitoksiin, jonka tuloksena saadaan syntyvät muodonmuutokset.

ABSTRACT

HENRY AAPRO: Utilizing simulation in minimization of welding induced distortion in an automatized T-profile welding system

Tampere University

Master of Science Thesis, 78 pages, 0 Appendix pages

February 2019

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Applied Mechanics and Thermal Engineering

Examiner: Associate Professor Sami Pajunen, Professor Reijo Kouhia

Keywords: welding induced distortion, residual stress, simulation, FEM

This work concerns distortion and residual stresses, which emerge in welded structures due to the thermal effects of the welding process. Welding induced distortion and residual stresses are caused by nonuniform heating and cooling of the work piece. The driving factors in the production of welding induced distortion are plastic strains, which are produced by nonuniform thermal effects.

Generally used means in prevention of welding induced distortion are usually based on thermal or mechanical processes, which induce counteracting forces in the work piece with respect to the internal forces induced by welding. Most of the prevention methods take place before or after welding, which increases manufacturing time and costs. In addition, the implementation of said processes requires expertise and experience of said subject.

Welding induced distortion can be controlled by using differential heating. This means that one of the pieces to be welded together is preheated more than the other to create initial deformation in the opposing direction with respect to welding. However, choosing the correct position and power to be used in the preheating process is a challenging task, in which simulation is proven to be a powerful tool.

The primary focus of this thesis is the determination of welding induced distortion in welded T-profiles using simulation. Simulation can also be used to figure out correct welding and preheating parameters in order to minimize distortion without unnecessary material waste created in welding tests. The procedure of simulating welding induced distortion is presented and its correspondence to measured results is displayed in this work. This thermal-elastic-plastic model takes all material properties into account as temperature dependent. Welding, material, geometry and preheating parameters are considered in the model.

The secondary focus is investigating the sensibility, accuracy and applications of simulation when it comes to determining welding induced distortion. In addition to the aforementioned model, another model based on the inherent strain approach is introduced. In this method the plastic strains and their volume are computed. They are assumed to be fully responsible for the induced distortion. The inherent strain approach is very useful in determining welding induced distortion in large structures. It requires plastic strains from a solved thermal-elastic-plastic analysis as an initial condition, but the advantage is that it only needs to be solved once per joint. The strains and their volumes are then imported to an elastic FE-model, which can be a large structure consisting of many similar welds.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:lle toimeksiantona Pemamek Oy:lta, joka toimii tämän työn rahoittajana. Työ on mahdollistanut syvällisen perehtymisen termisten ilmiöiden aiheuttamien muodonmuutosten ymmärtämiseen sekä niiden määrittämiseen simulointia hyödyntäen. Aihe on erittäin mielenkiintoinen, käytännönläheinen ja soveltuu pääaineeni aihepiiriin mainiosti, mikä lisäsi osaltaan mielenkiintoani työn tekemiseen.

Tahdon kiittää työni ohjaajia eli A-Insinöörit Suunnittelu Oy:sta Ville Lainetta ja Pemamek Oy:sta Niko Korkeakangasta, Jari Tervolinia sekä Jussi Kinnusta, koska heiltä saamani apu työssä kohtaamieni haasteiden ylittämiseksi oli korvaamatonta. Kiitokset myös Reijo Kouhialle sekä Sami Pajuselle diplomityöni tarkastamisesta, työn kommentoinnista ja erityisesti lujusopin perusteiden erinomaisesta opettamisesta yliopistouran alkuaikoina. Kiitokseni ansaitsevat myös perheeni, ystäväni sekä arvolliset kollegani, jotka ansiokkaasti kestivät satunnaisen vuodatukseni työn tekemisen hankaluuksista ja eivät upottaneet rystysiään kovin syvälle kasvoihini näinä haasteellisina aikoina.

Lopuksi tahdon kiittää myös kissaani, vaikken omista sellaista.

Tampereella, 24.1.2019

Henry Aapro

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET JA MUODONMUUTOKSET	2
	2.1 Hitsaamisen aiheuttamien jäännösjännitysten ja muodonmuutosten syntymekanismi	3
	2.2 Muodonmuutostyypit hitsatuissa rakenteissa	7
	2.3 Muodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät	9
	2.4 Hitsausprosessin vaikutus muodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin	11
3.	JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN HALLINTA	17
	3.1 Muodonmuutosten hallintamenetelmät	18
	3.2 Liikkuva differentiaaliesilämmitys	20
	3.3 Simuloinnin hyödyntäminen	24
4.	MUODONMUUTOSTEN LASKENNALLINEN MÄÄRITTÄMINEN	25
	4.1 Ajasta riippuva kimmoplastinen termomekaaninen analyysi	26
	4.1.1 Materiaaliominaisuuksien määrittäminen ja materiaalimalli	29
	4.1.2 Mallinnustekniikka	32
	4.2 Jäännösvenymämenetelmä	38
	4.2.1 Materiaaliominaisuudet ja materiaalimalli	41
	4.2.2 Mallinnustekniikka	42
	4.3 Muita menetelmiä	43
5.	LASKENTAMALLIN TULOKSET JA PARAMETRIEN VAIKUTUS MUODONMUUTOKSIIN	49
	5.1 Laskentamallin verifiointi	50
	5.2 Muunneltavien parametrien vaikutus muodonmuutoksiin	54
	5.2.1 Lämmöntuonti hitsin suuntaista mittayksikköä kohden	54
	5.2.2 Materiaali	56
	5.2.3 Geometria	59
	5.2.4 Esilämmitys	63
	5.3 Lämmöntuonnin mallinnustekniikan vaikutus muodonmuutoksiin	69
6.	YHTEENVETO	72
	LÄHTEET	74

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	Elementtimenetelmä (engl. Finite Element Method). Monikäyttöinen numeerinen menetelmä lujuusteknisten suureiden laskentaan.
HAZ	Muutosvyöhyke (engl. Heat Affected Zone). Hitsiä ympäröivä alue perusaineessa, jossa korkea lämpötila on vaikuttanut alueen mikro-rakenteeseen ja aineominaisuuksiin.
MAG	Metal Active Gas (welding). Hitsausprosessi, jossa kaari muodostuu kulutettavan hitsauslangan ja työstettävän kappaleen välille aiheuttaen kappaleen sulamisen ja toisiinsa liittymisen. Suojakaasuna käytetään hitsausta varten kehitettyä aktiivista suojakaasua, joka vaikuttaa hitsaukseen.
MIG	Metal Inert Gas (welding). Sama kuin MAG, mutta suojakaasuna käytetään inerttiä (reagoimatonta) suojakaasua, joka ei vaikuta hitsaukseen.
PDA	Plasticity-based Distortion Analysis. Yksinkertaistettu menetelmä hitsausmuodonmuutosten määrittämiseen
SDB	Strain as Direct Boundary. Yksinkertaistettu menetelmä hitsausmuodonmuutosten määrittämiseen.
TEPA	Ajasta riippuva kimmoplastinen termomekaaninen analyysi (engl. Transient Thermal-Elastic-Plastic Analysis)
VSR	Vibratory Stress Relieving. Värähtelyä hyödyntävä menetelmä jäännösjännitysten ja muodonmuutosten hallinnassa.
A	pinta-ala
b_f	laippalevyn leveys
c	ominaislämpökapasiteetti
D	hitsin jalkamitta
E	kimmokerroin
F	voima
F_n	nurjahdusvoima
h	konvektion lämmönsiirtokerroin
h_w	uumalevyn korkeus
I	sähkövirta
I_y	neliömomentti
k	materiaalin lämmönjohtavuus
L_n	nurjahduspituus
q	lämpövirta
Q	tuotu lämpö pituusyksikköä kohden
t_f	laippalevyn paksuus
t_w	uumalevyn paksuus
T	lämpötila
T_Y	myötöjännityksen ylitykseen vaadittu lämpötila
T_∞	ympäristön lämpötila, referenssilämpötila
U	kaarijännite
v	hitsausnopeus
α	lämpölaajenemiskerroin
$\Delta\varepsilon_1^p$	lämmitettäessä kappaleeseen syntyvä plastinen venymä
$\Delta\varepsilon_2^p$	jäähtyessä kappaleeseen syntyvä plastinen venymä

ε^*	jäännösvenymä (inherent strain)
$\varepsilon^{elastic}$	elastinen venymä
$\varepsilon^{plastic}$	plastinen venymä
$\varepsilon^{thermal}$	lämpövenymä
ε^{phase}	faasivenymä
ε^{creep}	virumavenymä
η	hyötysuhde
μ	nurjahdustapauksesta riippuva kerroin
ρ	tiheys
σ_I	lämmittämisen aikana syntyvä jäännösjännitys
σ_y	myötölujuus

1. JOHDANTO

Standardin SFS 3052 mukaan hitsaaminen on prosessi, jossa synnytetään atomien välinen sidos kappaleiden välille hyödyntäen lämpöä ja/tai puristusta siten, että ne muodostavat jatkuvan yhteyden [1]. Hitsaaminen aiheuttaa rakenteeseen jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia, joita halutaan hallita lukuisista käytännöllisistä syistä. Jäännösjännitykset vaikuttavat esimerkiksi kappaleen kestävyyteen ja stabiilisuuteen, muodonmuutokset puolestaan asennettavuuteen, kokoonpantavuuteen ja esteettisyyteen.

Tässä työssä esitellään hitsauksen aiheuttamien muodonmuutosten ja jäännösjännitysten syntymekanismi sekä niiden suuruuteen vaikuttavat tekijät, jotta voidaan saavuttaa riittävä ymmärrys ilmiöiden hallitsemiseksi. Sen jälkeen esitellään muodonmuutosten rajoittamiseksi nykyisin käytettyjä hallintakeinoja ja todetaan simuloinnin potentiaali aihepiirin parissa. Simulointi on melko tuore työkalu hitsausmuodonmuutosten hallinnan avustamisessa, mutta on muodostunut varteenotettavaksi vaihtoehdoksi tietokoneiden laskentatehon kasvaessa [2, 3, 4]. Työn pääpaino on muodonmuutosten simuloinnissa käytettyjen laskenta- ja mallinnusmenetelmien esittely sekä niiden tarkkuuden ja soveltuvuuden selvittäminen teollisuustarkoituksiin. Työn fokuksena ovat automatisoidulla T-profiilin hitsausasemalla hitsattujen palkkien muodonmuutosten määrittäminen sekä niiden minimoimismahdollisuuksien selvittäminen simulointia hyödyntäen. Hitsausjärjestelmällä on tehty useita testihitsauksia laskentamallien verifioimiseksi.

Työn simulointiosuudessa hyödynnetään elementtimenetelmään perustuvaa laskentaohjelmistoa ANSYS Mechanical R19.0. Simulaatiomallilla, jossa mallinnetaan koko hitsausprosessi mahdollisimman tarkasti, päästiin hyvin mittaustuloksia vastaaviin tuloksiin. Monimutkaisempiakin prosesseja ja liitoksia pystytään todennäköisesti simuloimaan tietokoneavusteisesti hyvällä tarkkuudella menetelmää käyttäen, kunhan laskennan lähtötiedot ovat tarpeeksi tarkat. Kuitenkin esimerkiksi materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuuden selvittäminen ilman itse suoritettuja materiaalitestejä voi osoittautua hankalaksi tehtäväksi erityisesti vähemmän käytetyillä materiaaleilla. Tuloksia tulkitessa on myös otettava huomioon testihitsauksilla saatujen mittaustulosten mahdolliset virhelähteet, kuten esimerkiksi levyihin hitsaamista edeltävistä prosesseista jääneet jäännösjännitykset tai muodonmuutokset sekä hajonta materiaaliominaisuuksissa valmistuserien välillä. Tuloksissa on siis aina jonkin verran virhettä, koska tilanne ei todellisuudessa ole koskaan ideaalinen, mutta teollisuuden tarpeisiin vastaava laskentatarkkuus tullaan todennäköisesti saavuttamaan.

2. JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET JA MUODONMUUTOKSET

Valmistusvaiheet ja erilaiset käsittelyprosessit aiheuttavat muodonmuutoksia valmistettaviin rakenteisiin. Muodonmuutokset aiheutuvat termisten ja mekaanisten voimien vaikutuksesta. Mahdolliset jäännösjännitykset syntyvät muodonmuutosten estymisestä. Muodonmuutos on todellisuudessa osittain estynyt, eli rakenteissa esiintyy sekä muodonmuutoksia että jäännösjännityksiä. Joitain prosesseja, jotka aiheuttavat muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä ovat esimerkiksi

- Levyjen polttoleikkaus
- Valssaus
- Raepuhallus
- Kylmämuovaus
- Hitsaus

Käytännössä jokainen prosessi, jossa aiheutetaan myötölujuuden ylittäviä jännityksiä rakenteeseen aiheuttaa pysyviä muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä riippumatta siitä, tapahtuuko myötöjännitysten ylitys termisen vai mekaanisen kuormituksen seurauksena. [5] Mikäli myötölujuutta ei ylitetä voi kappaleeseen silti jäädä jäännösjännityksiä, jos muodonmuutoksen palautuminen on estynyt esimerkiksi geometriamuutoksen johdosta. Näin käy esimerkiksi hitsausliitosten tapauksessa, kun lämpölaajentunut kappale ei pääsekään palautumaan alkuperäiseen pituuteensa. Tässä työssä keskitytään hitsausprosessin aiheuttamiin jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin sekä niiden määrittämiseen ja hallintaan. Esimerkkitapauksena käytetään molemmilta puolilta pienahitseillä koottavaa T-palkkia.

Rakenteeseen jäävät muodonmuutokset ja jäännösjännitykset ovat yleensä epätoivottuja ilmiöitä. Liian suuret muodonmuutokset kasvattavat valmistuskustannuksia ja hankaloittavat valmistusta. Eräs syy valmistuskustannusten nousuun ovat valmistustoleranssit. Valmistettavien osien tulee olla yhteensopivia tuotteen kokoonpanon tai asennettavuuden kannalta, tai tuotteen toiminnallisuus voi olla muuten riippuvainen valmistustarkkuudesta [6]. On myös mahdollista, että tuotteen täytyy pysyä muodossaan puhtaasti esteettisistä syistä. Nämä vaatimukset luovat tarpeen hitsausmuodonmuutosten määrittämiselle. [5,7]

Liialliset muodonmuutokset vaativat oikaisua. Mikäli oikaisu tapahtuu työstämällä, jäännösjännitysten vapautuminen voi vääristää osaa entisestään, jolloin ei päästäkään toivottuun lopputulokseen muodonmuutostilan näkökulmasta. Ylimääräiset käsittelyprosessit muodonmuutosten oikaisemiseksi lisäävät myös valmistusaikaa, mikä vuorostaan kasvattaa valmistuskustannuksia. [5]

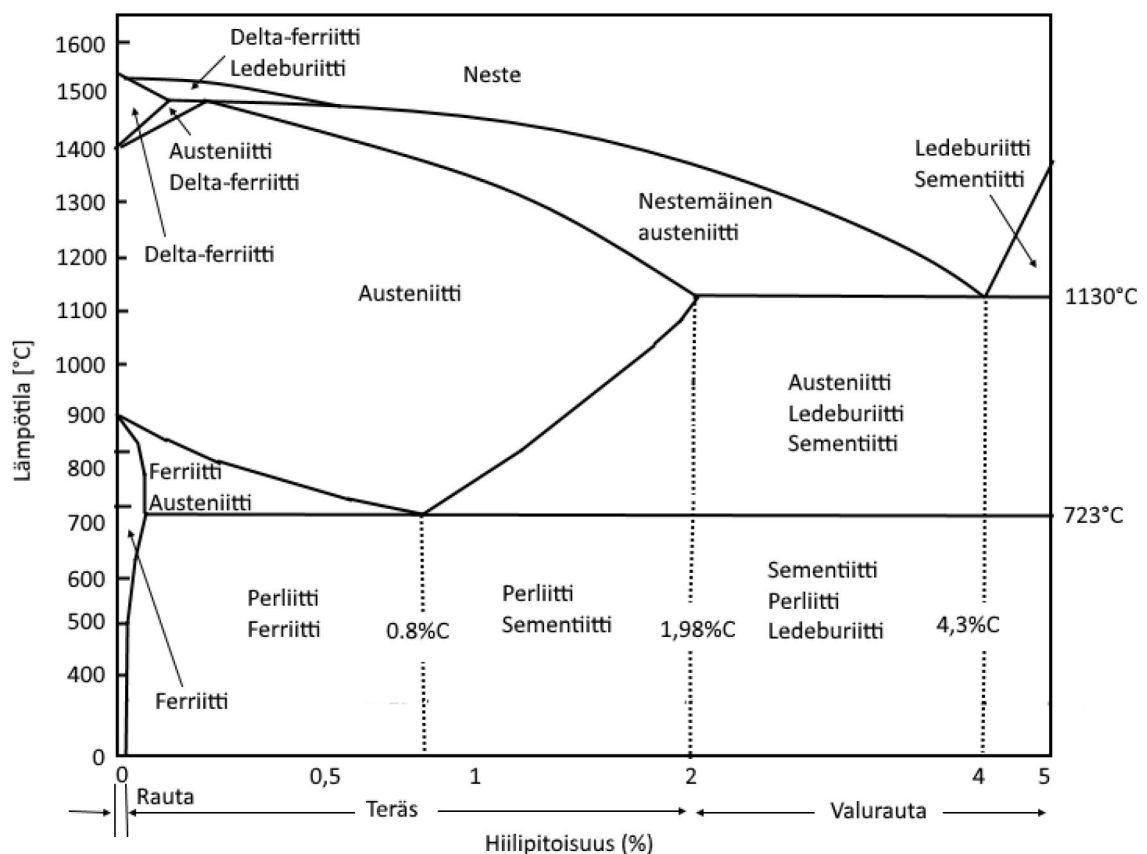
Hitsatuissa rakenteissa vetävät jäännösjännitykset vaikuttavat negatiivisesti rakenteen vetokapasiteettiin ja puristavat jäännösjännitykset puristuskapasiteettiin. Ilmiöt voivat aiheuttaa rakenteelle myös lisämomenttia, jos hitsin kohdalta rakennetta kuormittava jäännösjännitys on epäkeskeinen hitsattavan rakenteen vetojäykkyykeskiöön nähden. Tämä ongelma esiintyy esimerkiksi hitsaamalla koottavissa T-palkeissa, joissa palkkiin jäävä jäännösjännitys ilmenee osittain hitsausmuodonmuutoksina eli pääasiassa palkin kaareutumana ja laippalevyn reunojen nousemisena eli kulmavetäymänä. Erikoistapauksissa jäännösjännityksistä voi olla myös hyötyä, esimerkiksi staattisesti kuormitetuissa rakenteissa vetävällä jäännösjännityksellä on positiivinen vaikutus puristuskapasiteettiin ja päin vastoin. Rakenteen väsymislujuus laskee vetävien jäännösjännitysten johdosta, koska vetävä jännitys avaa säröjä, jolloin särönkasvu kiihtyy. Vastaavasti väsymislujuus kasvaa puristavilla jäännösjännityksillä, koska ne pienentävät särönkasvun nopeutta säröjä sulkevan vaikutuksen takia. [8]

2.1 Hitsaamisen aiheuttamien jäännösjännitysten ja muodonmuutosten syntymekanismi

Sulahitsaus on prosessi, jossa toisiinsa liitettäviä kappaleita lämmitetään liitoskohdasta materiaalin sulamispisteen ylittävään lämpötilaan, liittäen kappaleet toisiinsa joko käyttäen täyteainetta tai ilman sitä. Oleellista on, että mahdollisen täyteaineen lisäksi myös liitettävät osat sulavat ja kappaleiden välille muodostuu jatkuva metallinen eli atomien välinen sidos. [6] Prosessia, jossa vain väliaine sulaa, kutsutaan juottamiseksi. Suurin osa hitsaamisesta aiheutuvasta lämmöstä kulkeutuu hitsistä johtumalla perusaineeseen ja jäljelle jäävä osa lämmöstä siirtyy konvektion ja säteilyn välityksellä ympäröivään ilmaan. [7]

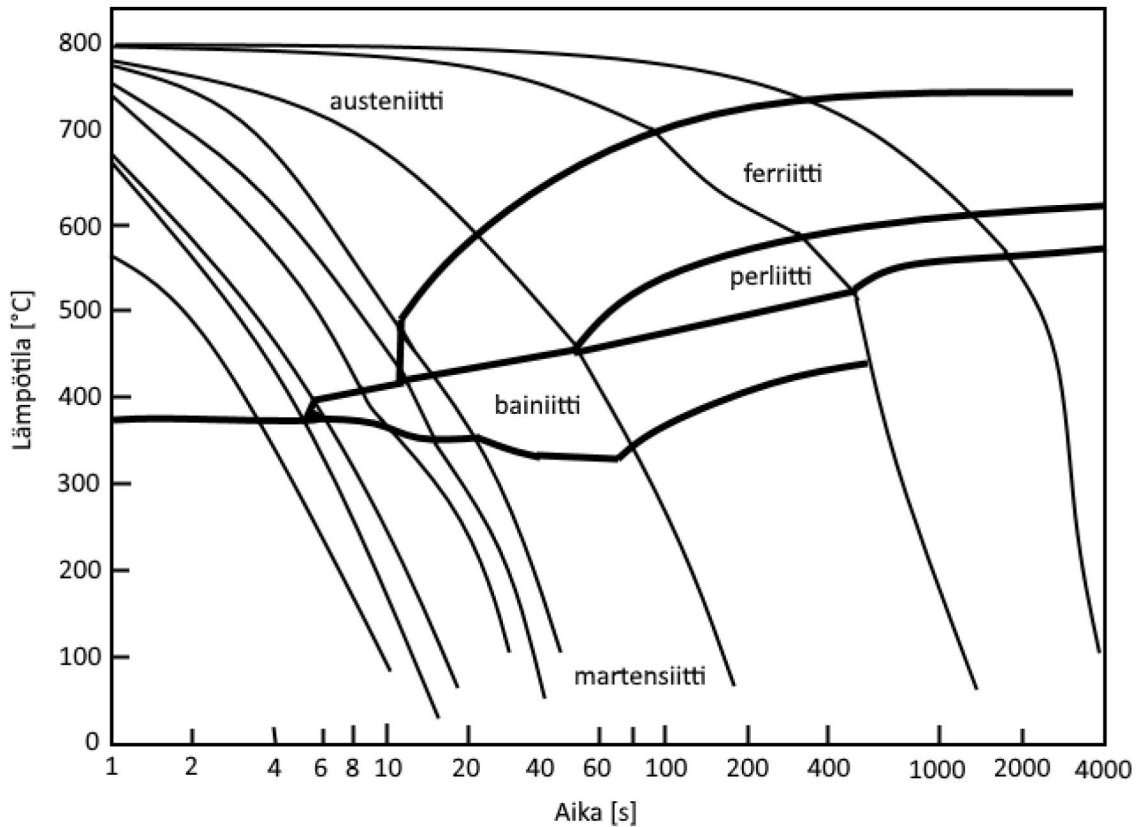
Riippumatta hitsausprosessista ja hitsityypistä jäännösjännitysten ja muodonmuutosten syntymekanismi hitsausprosessissa on aina sama. Alussa hitsin tuoma lämpö välittyy johtumalla perusaineeseen. Lämpötilan nousu aiheuttaa myötölujuuden laskemista ja perusaine pyrkii laajenemaan. Ympäröivä kylmempi materiaali ei kuitenkaan laajene, jolloin se vastustaa lämpimämmän alueen laajenemista aiheuttaen tyssäntymistä eli kuumemman materiaalin kokoon painumista. Hitsaamisen jälkeen hitsin ja hitsiä ympäröivän muutosvyöhykkeen (HAZ, Heat Affected Zone) jäähtyessä lämpimät alueet pyrkivät kutistumaan. Jäähtymisen aikana materiaalin myötölujuus nousee ja tyssäntymistä vastaavaa plastista venymää ei synny, eli lämpimämmän alueen kutistuminen estyy. Tällöin hitsin ja HAZ:n jäähtyessä syntyvät jännitykset jäävät pysyviksi. Näitä jännityksiä kutsutaan jäännösjännityksiksi. Kutistuminen ei ole kuitenkaan täysin estynyt, jolloin lämpimän alueen kutistuessa ympäröivä kylmempi materiaali seuraa perässä, aiheuttaen rakenteen hitsausmuodonmuutokset. [5, 7] Yksinkertaisesti ilmaistuna hitsattavan kappaleen epätasainen lämpeneminen ja jäähtyminen ovat vastuussa hitsattavien rakenteiden hitsausmuodonmuutosten ja jäännösjännityksien muodostumisesta [8].

Kuten edellä esitetystä hitsausmuodonmuutosten syntymekanismista voidaan päätellä, materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuus on suuressa roolissa muodonmuutosten synnyssä. Hiiliteräksen lämpölaajenemiskerroin pääsääntöisesti kasvaa lämpötilan funktiona, lukuun ottamatta lyhyttä lämpötila-aluetta noin 700 °C – 900 °C välissä, jossa lämpölaajenemiskerroin hieman laskee [9]. Ilmiö johtuu teräksen kiderakenteen muutoksista. Lämpölaajenemiskerroin pääsääntöisesti kasvaa lämpötilan funktiona, jolloin kutistuminen on voimakkainta jäähtymisprosessin alussa korkeissa lämpötiloissa. Vastaavasti materiaalin lujuus on suurin matalissa lämpötiloissa, joten jäännösjännitysten synty on voimakkainta jäähtymisen loppuvaiheessa. [5]



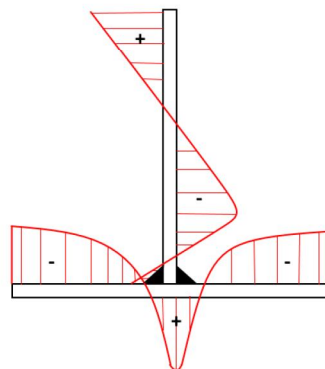
Kuva 1. Kiderakennemuutokset lämpötilan ja hiilipitoisuuden funktiona, jotka vaikuttavat mm. syntyviin muodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin. [10]

Riippuen teräksen lujuudesta myös faasimuutoksilla saattaa olla merkittävä vaikutus muodonmuutoksiin. Faasimuutosten vaikutusta voidaan selvittää kuvan 1 avulla. Esimerkiksi matalahiilinen hiiliteräs, jonka mikrorakenne koostuu ferriitistä ja perliitistä, muuttuu austeniittiseksi n. 700°C lämpötilassa kuvan 1 mukaisesti. Tämän jälkeen olomuoto muuttuu joko martensiittiseksi tai takaisin ferriittiseksi, riippuen jäähtymisnopeudesta kuvan 2 mukaisesti. Hitsausliitoksen aluetta, jossa lämpötila nousee niin korkeaksi, että austeniittinen olomuodonmuutos tapahtuu, kutsutaan muutosvyöhykkeeksi (Heat Affected Zone, HAZ).



Kuva 2. S500 teräksen faasit jäähtymisnopeudesta riippuen [11]

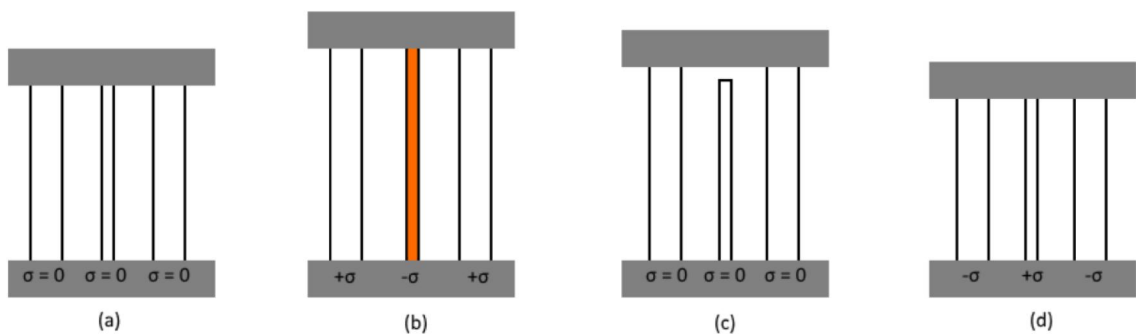
Ferriitti ja perliitti ovat matalahiilisen teräksen stabiileja olomuotoja matalassa lämpötilassa ja austeniitti korkeassa lämpötilassa. Austeniittisessa tilassa teräksen kimmokerroin ja myötölujuus ovat pienempiä kuin ferriittisessä tilassa. Nopeasti jäädytettäessä austeniittisesta teräksestä muodostuu martensiittistä. Martensiitti on kovaa mutta haurasta, jolloin martensiittinen muodonmuutos voi johtaa säröjen syntyyn hitsissä. Tämän johdosta hitsausliitoksen liian nopeaa jäähtymistä on vältettävä. Vastaavasti perliittiä syntyy kapaleen jäähtyessä hitaasti. Bainiitti on väliolomuoto, jota syntyy jäähtymisnopeuden ollessa hitaampi kuin martensiitin muodostumisessa, mutta nopeampi kuin perliitin muodostumisessa. [7, 12]



Kuva 3. Hitsaamisen aiheuttamat jäännösjännitykset T-palkissa [13]

Kuvassa 3 esitetään hitsattuihin T-liitoksiin muodostuvat jäännösjännitykset. Hitsiä ympäröivälle alueelle jää vetävä jäännösjännitys, koska kappale on lämpölaajentunut ja se ei pääse kutistumaan alkuperäiseen pituuteensa ympäröivän kylmemmän perusaineen estäessä sen kutistumisen jäähtymisen aikana. Laippalevyn reunoille syntyy tasapainottava puristava jäännösjännitys. Uumalevyssä hitsausalueen vetäviä jäännösjännityksiä tasapainottava, puristuksella oleva alue sijaitsee kauempana hitsausalueesta. Uumalevyn vapaassa reunassa jäännösjännitykset muuttuvat taas vetäviksi palkin taivutuksen (kaareutumisen) yläpinnalle aiheuttaman vedon ansiosta. [14]

Hitsaamisen aiheuttamien jäännösjännitysten muodostumista havainnollistetaan usein kirjallisuudessa [7, 12, 14] kolmen lämmitetyn tangon mallin avulla. Kuvan 4 tapauksen (a) mukaisesti tangot ovat alkutilassa kaikki saman pituisia, jännityksettömiä ja päästään kiinnitettyjä. Keskimäinen tanko on halkaisijaltaan pienempi kuin reunimmaiset tangot, koska hitsausliitoksessa hitsin kattama lämmin alue on lähes poikkeuksetta pienempi kuin sitä ympäröivä alue. Keskimäistä tankoa lämmitettäessä siihen syntyy puristava jännitys, koska se pyrkii lämmitessään laajenemaan, mutta ei kykene siihen esteettömästi viereisten tankojen estäessä sen. Näihin reunimmaisiiin tankoihin syntyy puolestaan vetävä jännitys niiden pidentyessä (b). Lämpötilan noustessa tarpeeksi korkealle, materiaalin myötölujuus laskee ja lämmitettyyn tankoon muodostuu plastisia eli pysyviä venymiä. Tapauksessa (c) havainnollistetaan mitä tapahtuisi, jos tangot eivät olisikaan toisesta päästään kiinnitettyjä, vaan ne pääsisivät kutistumaan vapaasti jäähtyessään. Tällöin keskimäinen tanko kutistuu lyhyemmäksi kuin sen alkuperäinen pituus, koska siihen aiheutettiin puristavia jäännösjännityksiä. Tankojen ollessa kuitenkin kiinnitettyjä molemmista päistään (d), kutistaa keskimäinen tanko reunimmaisiet tangot puristukselle, jolloin sen oma jännitystila muuttuu vetäväksi. Keskimäiseen tankoon muodostuu siis vetävä jäännösjännitys ja reunimmaisiiin tankoihin puristava jäännösjännitys. Tällä tavoin voidaan selkeästi havainnollistaa hitsausprosessin muodostamaa jäännösjännitystilaa päätylevyliitoksissa sekä T-liitosten laipoissa.

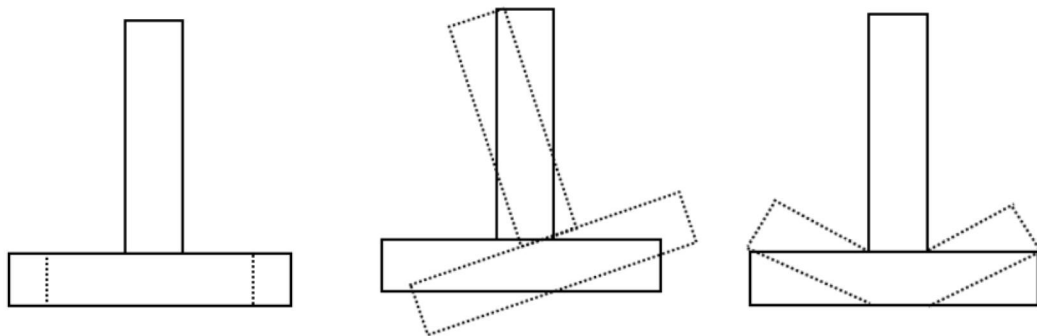


Kuva 4. Jäännösjännitysten havainnollistaminen kolmen tangon mallin avulla [14]

2.2 Muodonmuutostyypit hitsatuissa rakenteissa

Hitsatessa syntyvät muodonmuutokset jaetaan kahteen kategoriaan riippuen niiden suunnasta hitsaussuunnan suhteen, eli muodonmuutoksiin hitsin pituus- ja poikittaissuunnassa. [7, 14] Kummassakin kategoriassa on omat spesifimmät muodonmuutostyyppinsä. Kahdesta levystä muodostettua T-liitosta, joka on muodostettu kaksipuoleisilla symmetrisillä pienahitseilla, käytetään muodonmuutoksia havainnollistavana esimerkkinä, koska työn pääpaino on T-liitosten muodonmuutosten määrittämisessä ja hallinnassa.

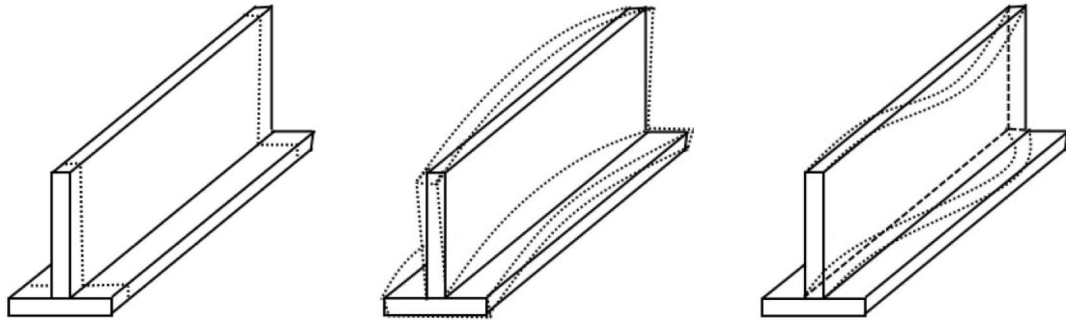
Poikittaissuuntaisia, hitsaamisen aiheuttamia muodonmuutoksia ovat *poikittaiskutistuma*, *kiertymä* ja *kulmavetäymä*. **Poikittaiskutistuman** aiheuttaa lämpimän alueen kutistuminen sen jäähtyessä, koska levykenttä siirtyy tällöin tasossaan hitsin suuntaan. **Kiertymä** aiheutuu hitsaamisen alkupään jäähtyneen hitsin vastustaessa koko levyn kutistumista, jolloin se toimii nivelenä uuden hitsaussulan aiheuttamalle kutistumiselle ja profiilin poikkileikkaus kiertyy tasossaan. **Kulmavetäymän** synty tapahtuu kahdessa vaiheessa: korkeassa lämpötilassa lämpölaajeneminen on voimakkaampaa levyn hitsatulla puolella, jolloin levy kaareutuu kohti hitsaamatonta puolta. Jäähtyessä ja lämpötilaeron tasaantumisessa ainevahvuuden yli, hitsiin ja HAZ:lle syntyneet plastiset venymät ovat suuremmat kuin hitsaamattomalle puolelle syntyneet venymät ja tällöin kutistuminen on hitsatulla puolella voimakkaampaa. Tällöin kutistuva alue vetää levyä takaisin kohti hitsattua puolta. Kulmavetäymän suuruuteen vaikuttaa lämpötilagradientti ainevahvuuden yli sekä liitoksen jäykkyys, eli käytännössä laippalevyn ainevahvuus. [7, 15] Kuvassa 5 havainnollistetaan poikittaissuuntaiset muodonmuutokset T-profiilissa.



Kuva 5. Vasemmalta oikealle: *poikittaiskutistuma*, *kiertymä*, *kulmavetäymä*

Pituussuuntaisia muodonmuutoksia ovat *pituuskutistuma*, *kaareutuminen* ja *lommoutuminen*. **Pituuskutistuman** aiheuttaa hitsialueen vapaa kutistuminen kuvan 6 tapauksen (a) mukaisesti. Jännösjännitys on noin myötölujuuden suuruinen [12]. **Kaareutuminen** aiheutuu jäännösjännitysten kohdistumisesta hitsille ja HAZ:lle, jolla on epäkeskisyyttä hitsattavan profiilin vetojäykkyysskeskiön suhteen. Jännösjännityksen aiheuttaman voiman epäkeskisyyys aiheuttaa rakenteeseen momentin, joka puolestaan aiheuttaa rakenteen kaareutumisen. Kaareutumista voi tapahtua kahteen suuntaan, eli profiilin pystysuuntaan ja sivusuuntaan riippuen profiilin vetojäykkyysskeskiön sijainnista hitsauslinjan suhteen.

Lommoutumista esiintyy ohuissa ja hoikissa rakenteissa, kun rakenteeseen kutistuman aiheuttama puristava jännitys aiheuttaa stabiiliuden menetyksen eli rakenne lommahtaa, kiepahtaa tai nurjahtaa. Pituussuuntaiset muodonmuutostyypit esitellään kuvassa 6.



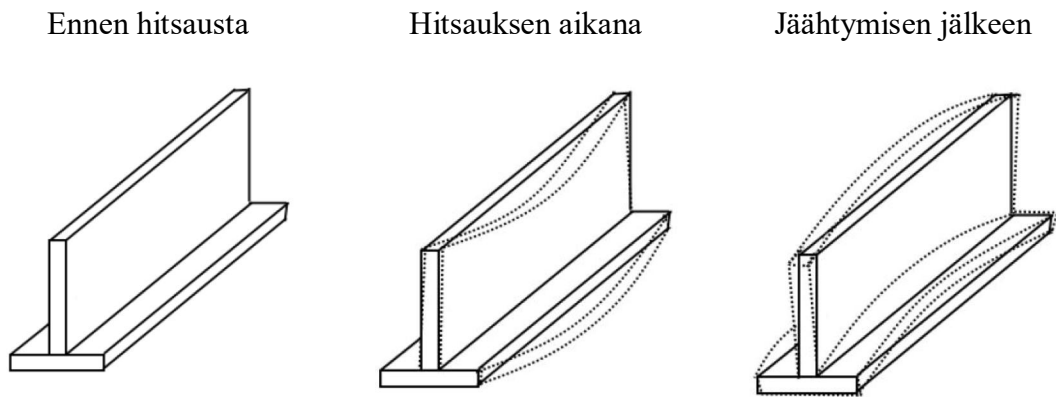
Kuva 6. Vasemmalta oikealle: pituuskutistuma, kaareutuma, lommoutuminen

Edellä esitellyistä muodonmuutoksista tämän työn näkökulmasta tärkeimpiä, eli toleranssitaulukoissa tiukimmin säädeltyjä ja symmetrisesti hitsatessa syntyviä muodonmuutostyyppejä ovat *kulmavetäymä* sekä *kaareutuminen*. Tämän vuoksi tässä työssä keskitytään erityisesti näiden muodonmuutostyyppien määrittämiseen ja hallintaan. Tiivistelmä muodonmuutostyypeistä esitetään taulukossa 1.

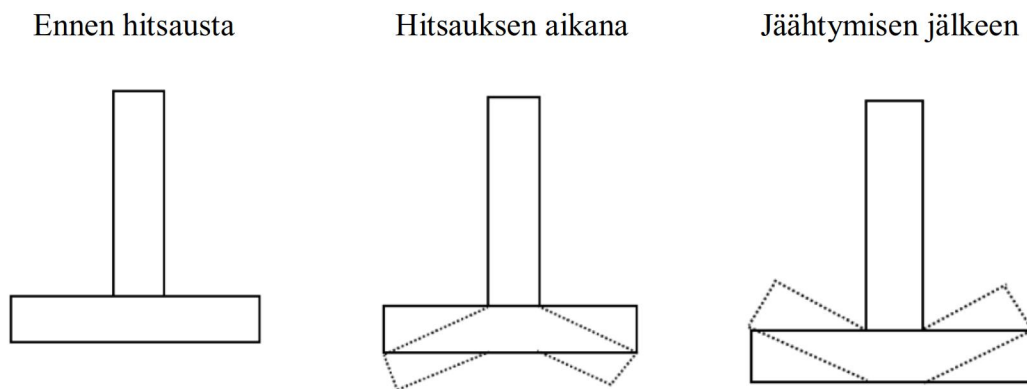
Taulukko 1. Muodonmuutostyypit hitsattavissa rakenteissa.

Poikittaissuuntaiset	Pituussuuntaiset
Poikittaiskutistuma	Pitkittäiskutistuma
Kiertymä	<i>Kaareutuminen</i>
<i>Kulmavetäymä</i>	Lommoutuminen

Lopulliset muodonmuutokset rakenteeseen muodostuvat kappaleen jäähtyttyä. Hitsausprosessin aikana muodonmuutokset ovat hyvin erilaisia. Esimerkiksi kulmavetäymän havaitaan hitsauksen aikana taivuttavan laippaa poispäin uumalevystä, koska hitsin ja HAZ:n alueella lämpölaajeneminen on voimakkaampaa kuin vastapuolella. [16] Vastavasti kaareutumista esiintyy laipan puoleiseen suuntaan profiilin pystysuunnassa, koska hitsausalueen korkea lämpö venyttää rakennetta lämpölaajenemisen seurauksena. Tämä synnyttää alueelle vetävän jännityksen, jolla on epäkeskisyyttä vetojäykkyykeskiöön. Rakenteen jäähtyessä se kutistuu ja lopulta jännitys muuttuu vetävästä puristavaksi, jolloin taivutuksen suunta vaihtuu ja kaareutumaa havaitaan vastakkaiseen suuntaan. Muodonmuutosten käyttäytymistä eri hitsausprosessin vaiheissa esitetään kuvissa 7 ja 8.



Kuva 7. Kaareutuma eri vaiheissa hitsausprosessia



Kuva 8. Kulmavetäymä eri vaiheissa hitsausprosessia

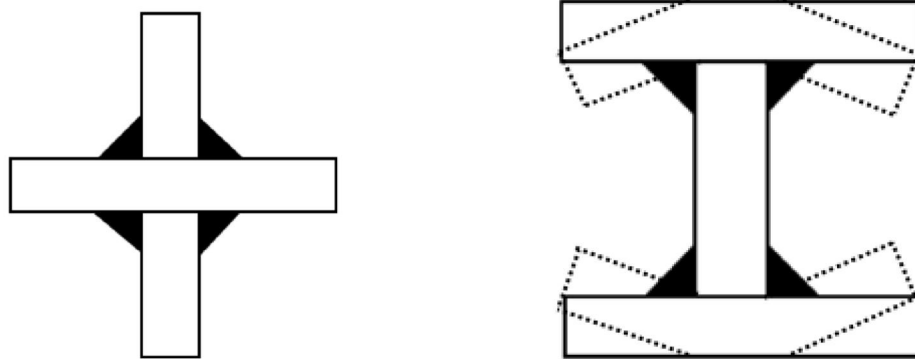
2.3 Muodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät

Hitsausmuodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kahteen ryhmään: kappaleen lämmöntuontiin vaikuttavat tekijöihin (eli ”kuormitukseen vaikuttaviin tekijöihin”) sekä kiinnityksiin (eli ”reunaehtoihin”). Kuten jokaisessa mekaniikan ongelmassa, jännitystilaan ja muodonmuutoksiin vaikuttavat sekä kuormitukset että reunaehdot.

Kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat hitsattavan rakenteen geometria ja materiaaliominaisuudet sekä hitsausprosessissa käytettävät hitsausparametrit. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat olennaisesti kappaleeseen muodostuviin hitsausmuodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin rakenteeseen muodostuvan kuormituksen kautta. Rakenteen geometria vaikuttaa siihen, millainen lämpöjakauma rakenteeseen muodostuu ja tätä kautta millaiselle alueelle jäännösjännitykset jakautuvat. Näin rakenteen geometria vaikuttaa rakenteeseen syntyviin sisäisiin voimiin ja momentteihin. Esimerkiksi hitsin ollessa kaukana profiilin vetojäykkyykeskiöstä, syntyy rakenteeseen suurempi sisäinen momentti, koska voiman momenttivarsi kasvaa. Kuormitukseen vaikuttavat myös materiaaliominaisuudet; esimerkiksi lämmönjohtavuus nimensä mukaisesti määrittelee, kuinka laajalle alueelle hit-saamisen tuoma lämpö ehtii levittäytyä. Hitsausparametrit vaikuttavat puolestaan suoraan

lämmöntuonnin suuruuteen ja tätä kautta syntyviin venymiin ja jäännösjännityksiin. Lämmöntuontiin vaikuttavia parametreja ovat hitsausnopeus sekä hitsaamisessa käytetty sähkövirta ja jännite eli hitsausteho. Yhdessä nämä määrittävät lämmöntuonnin hitsin suuntaista mittayksikköä kohden. Lisäksi lämmöntuonnin laskennassa tulee ottaa huomioon hitsausprosessin terminen hyötysuhde. [17]

Geometrian osalta T-palkkien tapauksessa oleellisia tekijöitä ovat yhteen hitsattavien levyjen ainevahvuudet sekä ulkomitat. Palkin pituudella ei periaatteessa ole merkitystä; pidemmällä palkilla on suurempi kaareutuma, mutta hitsaustestien mittaustulosten sekä pienten siirtymien teorian perusteella havaitaan, että kaareutuma mittayksiköllä pysyy lähimain vakiona. Symmetriaa hyödyntämällä voidaan pienentää olennaisimpia muodonmuutostyyppisiä. Kulmavetäymä voidaan eliminoida hitsaamalla kappale symmetrisesti ainevahvuuden yli molemmin puolin, kun taas kaareutuma voidaan eliminoida hitsaamalla kappale sen vetojäykkyyden suhteen symmetrisesti [5]. Kuvassa 9 sekä kaareutuma että kulmavetäymä on eliminoitu vasemman puoleisessa rakenteessa symmetrian avulla, kun taas oikean puoleisessa rakenteessa vain kaareutuma on eliminoitu.

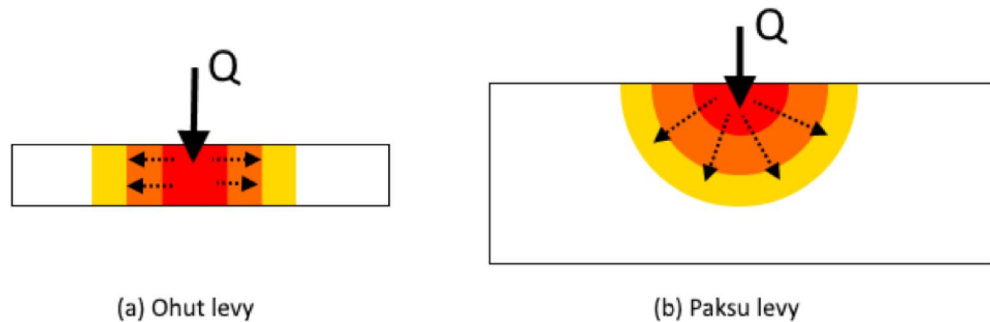


Kuva 9. Symmetrian hyödyntäminen hitsausmuodonmuutosten hallitsemisessa

Olellaisia muodonmuutoksiin vaikuttavia materiaaliparametreja ovat kimmokerroin, myötölujuus, lämpölaajenemiskerroin, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus, jotka ovat kaikki lämpötilariippuvaisia materiaaliominaisuuksia. Bhattin ja Barsoumin tutkimuksen mukaan materiaalin termisistä ominaisuuksista ominaislämmön lämpötilariippuvuus vaikuttaa eniten muodonmuutoksiin, kun taas mekaanisista ominaisuuksista myötölujuus on tärkeintä mallintaa lämpötilariippuvaisena [18]. Hitsattavan rakenteen lämpötila muuttuu lokaalisti hitsausprosessin edetessä, jolloin materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuuden takia ilmiö tulee ottaa huomioon myös simulaatiomalleissa, mikä tekee analyysistä ajasta riippuvia.

Lämmöntuonnin pienentämisellä joko hitsaustehoa laskemalla tai hitsausnopeutta kasvattamalla voidaan pienentää lähes kaikkia muodonmuutostyyppisiä. Sekä hitsausnopeuden kasvattaminen, että hitsaustehon laskeminen pienentävät lämmöntuontia aiheuttaen matalamman lämpötilan nousun ja pienemmän HAZ:n, mikä pienentää hitsausmuodonmuutoksia. [19] Poikkeuksena on hyvä huomata, että tietyillä laipan ainevahvuuksilla päittäis-

ja pienahitsausliitoksissa kulmavetäymän arvo kasvaa, vaikka lämmöntuontia pienennetään, kuten luvussa 5 todetaan. Tämä johtuu siitä, että lämpöjakauma ei ulotu enää ainevahvuuden yli kuvan 10 mukaisesti, eli siirrytään kuvan tapauksesta (a) tapaukseen (b), jolloin lämpötilagradientti ainevahvuuden yli kasvaa aiheuttaen suuremman muodonmuutoksen.



Kuva 10. Hitsaamisen aiheuttama lämpöjakauma ohuessa ja paksussa levyssä [12]

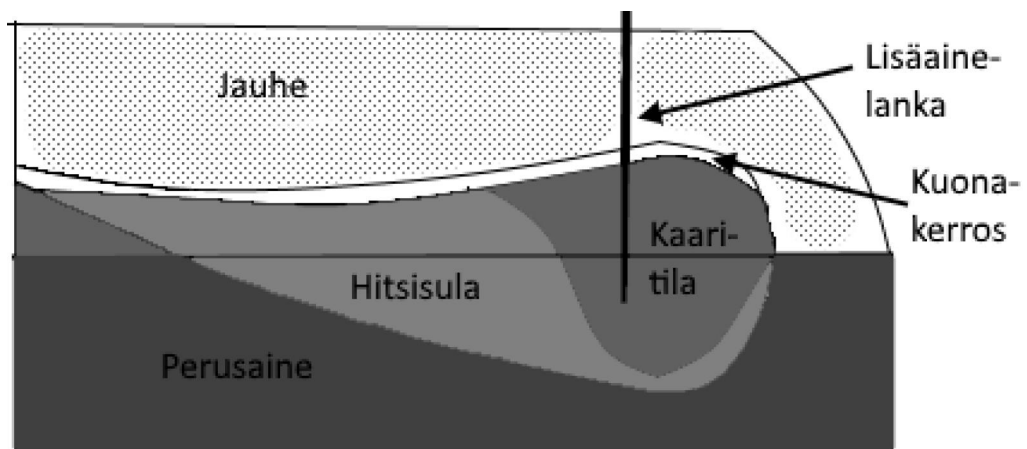
Itse hitsi osallistuu myös muodonmuutosten syntyyn. Muodonmuutoksiin vaikuttavat esimerkiksi tunkeuma ja hitsityyppi eli hitsin geometria [20]. Suuri tunkeuma pienentää kulmavetäymää ohuiden ainevahvuuksien rakenteissa. Suurempi tunkeuma tarkoittaa suurempaa lämmöntuontia, jolloin lämpötilajakauma on tasaisempi ainevahvuuden yli. Tämä puolestaan johtaa pienempiin muodonmuutoksiin kulmavetäymän suhteen. [16] Toisaalta suurempi lämmöntuonti tarkoittaa suurempaa HAZ:ia, mikä johtaa suurempaan plastiiseen venymäalueeseen poikkileikkauksessa, joka puolestaan kasvattaa kaareutumaa. Katkohitsit vähentävät hitsausmuodonmuutoksia, koska hitsipalkojen väliin jää kylmempiä alueita, jotka vastustavat muodonmuutosten syntyä. Katkohitseillä voi erityisesti pienentää pitkittäiskutistumaa. Katkohitsejä käyttäessä on kuitenkin huomioitava, että niitä ei suositella käytettäväksi väsymiselle alttiissa liitoksissa. [5]

Lisäksi muodonmuutoksiin vaikuttavat mm. faasimuutokset, alkutilanteessa hitsattavien kappaleiden välissä oleva alkurako [21] sekä esilämmityksen suuruus ja sijainti [7, 14]. Kaikki edellä mainitut ovat hitsaamisen kappaleeseen muodostavaan kuormitukseen liittyviä parametreja, joiden kautta syntyviin muodonmuutoksiin voidaan hitsausprosessia suunnitellessa vaikuttaa. Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi muodonmuutoksiin voidaan vaikuttaa reunaehtoista, kuten kiinnittimien ja tuentojen avulla. Kuormitusten jakautuminen rakenteeseen riippuu käytetyistä reunaehdoista.

2.4 Hitsausprosessin vaikutus muodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin

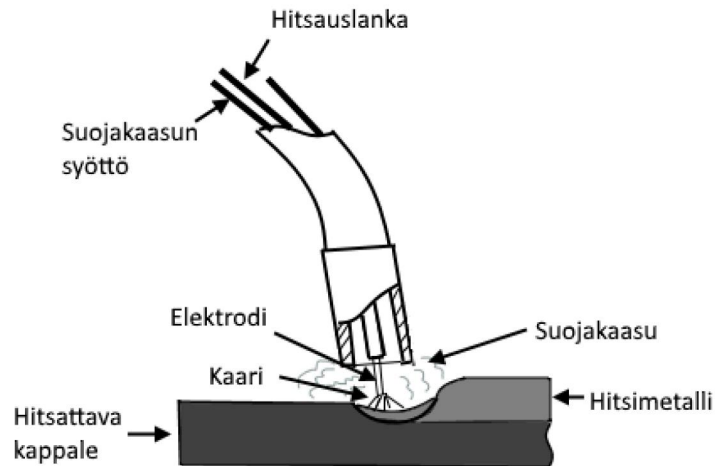
Hitsausprosessi vaikuttaa muodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin pääasiassa lämmöntuonin, hitsausnopeuden ja tunkeuman eroavaisuuksien kautta. Tässä luvussa esitellään lyhyesti muutamia yleisimpiä hitsausprosesseja ja selvennetään niiden vaikutusta hitsausmuodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin.

Suomessa yleisin käytetty hitsausprosessi 1980-luvun puoliväliin asti oli **jauhekaarihitsaus** [22]. Jauhekaarihitsauksessa hitsattava liitos upotetaan hitsausjauheeseen, jonka alla valokaari palaa sulattaen lisäainelankaa ja liittäen hitsattavat osat toisiinsa. Jauheesta sulaa osa, muodostaen kuonakerroksen hitsin päälle. Menetelmän etuina pidetään sen suurta tehokkuutta, suurta tunkeumaa, toimintavarmuutta ja menetelmän turvallisuutta. Hitsauksen seurauksena syntyvien muodonmuutosten kannalta olennaisia tekijöitä ovat prosessin suuri lämmöntuonti ja suuri tunkeuma. Suuren tunkeuman johdosta T-liitoksissa voidaan odottaa pienempiä kulmavetäymiä ohuilla laippalevyillä, koska lämpötilaero levyn pintojen välillä on pienempi. [16] Vastaavasti voidaan odottaa verrattain suurta kaareutumaa suuren lämmöntuonnin johdosta. Jauhekaarihitsauksen periaate ja kuva hitsaustilanteesta esitetään kuvassa 11.



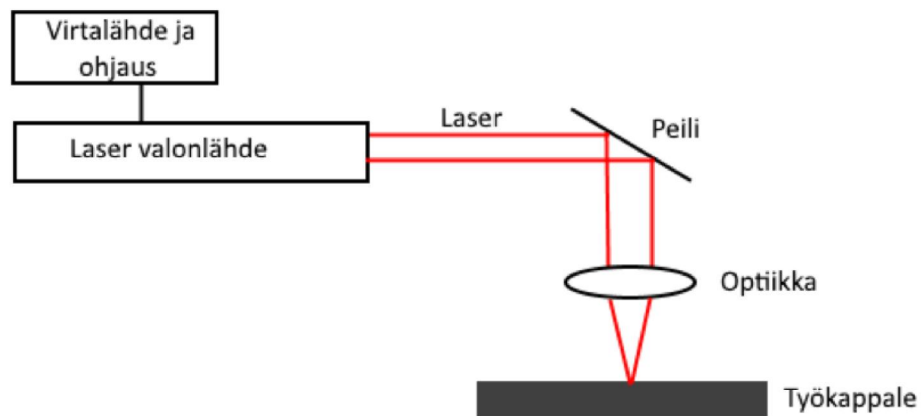
Kuva 11. Jauhekaarihitsauksen toimintaperiaate [23]

MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas) on nykyään jauhekaarihitsausta käytetympi kaarihitsausmenetelmä [22], jossa käytetään jauheen sijaan suojakaasua. Suojakaasu suojaa liitosta ilman epäpuhtauksilta. MAG hitsauksessa suojakaasu on aktiivista, eli se reagoi hitsausprosessin aikana hitsattavan metallin kanssa. Suojakaasu vaikuttaa mm. valokaaren stabiiliuteen, hitsaussulan käyttäytymiseen, tunkeumaan, hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin ja roiskeiden määrään. MIG hitsauksessa suojakaasu ei reagoi hitsausprosessin aikana hitsattavien metallien kanssa, koska suojakaasu on inerttiä eli reagoimatonta. [22] MIG/MAG:lla lämmöntuonti ja tunkeuma ovat jauhekaarihitsausta vastaavasti suuret, koska molemmat ovat kaarihitsausmenetelmiä. MIG/MAG hitsauksen toimintaperiaate esitetään kuvassa 12. Lämmöntuonti ja tunkeuma ovat tyypillisesti jauhekaarihitsausta pienempiä.



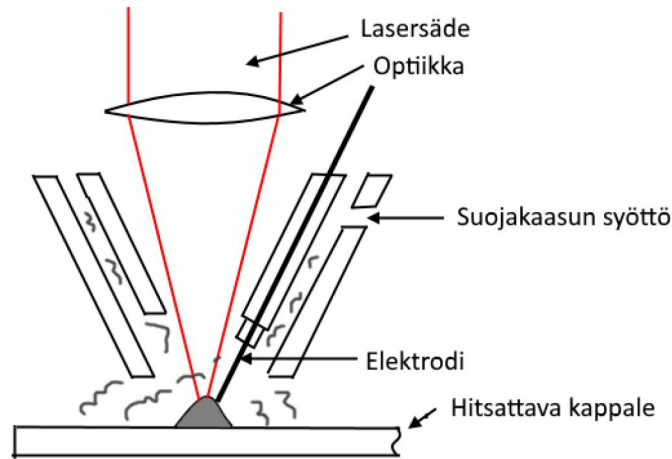
Kuva 12. MIG/MAG -hitsauksen toimintaperiaate [13]

Laserhitsausmenetelmillä voidaan hitsata nopeasti korkealla lämmöntuonin tehotiheydellä. Kokonaislämmöntuonti kappaleeseen on kuitenkin kaarimenetelmiä vähäisempi suuren hitsausnopeuden ansiosta. Tämän johdosta laserhitsaamalla voidaan saavuttaa pienemmät jäännösjännitykset ja hitsausmuodonmuutokset kuin perinteisillä kaarihitsausmenetelmillä. [24] Menetelmällä saavutettava hitsin muutosvyöhyke (HAZ) on erittäin kapea kaarihitsausmenetelmiin verrattuna. Laserhitsausmenetelmän toimintaperiaate esitetään kuvassa 13.



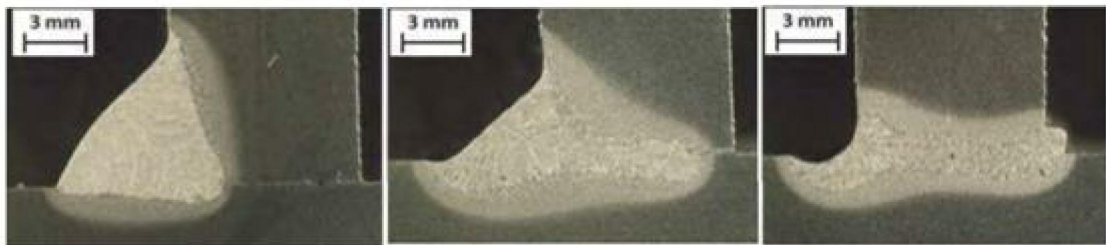
Kuva 13. Laserhitsauksen toimintaperiaate mukailten lähde [13]

Laserhybridihitsaus yhdistää kaari- ja laserhitsauksen parhaat puolet: sillä saavutetaan kaarihitsauksen hyvä hitsauslaatu sekä laserhitsauksen matalammat jäännösjännitys- ja muodonmuutostasot sekä hyvät väsymisominaisuudet, koska prosessissa voidaan käyttää matalampaa lämmöntuontia kaarihitsaukseen verrattuna. [24] Laserhybridihitsauksen toimintaperiaate esitetään kuvassa 14.



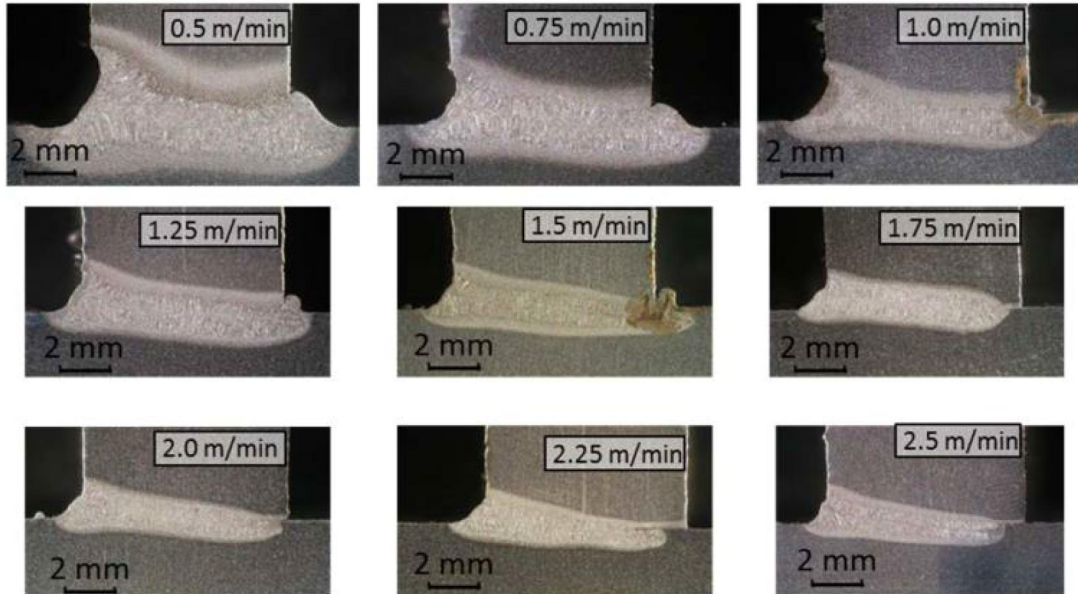
Kuva 14. Laserhybridihitsauksen toimintaperiaate [24]

Yleisellä tasolla voidaan todeta, että kaarihitsausmenetelmillä on suuri lämmöntuotto ja tunkeuma, jotka vaikuttavat positiivisesti ohuiden laippojen kulmavetäymään ja negatiivisesti kaareutumaan. Vastaavasti laserhitsausmenetelmillä kaareutuma ja kulmavetäymä paksuilla levyillä on vähäisempää pienemmän lämmöntuonnin ansiosta, mutta ohuilla laippalevyillä kulmavetäymä on suurempi. Laserhybridi on kompromissivaihtoehto kaari- ja laserhitsauksen väliltä lämmöntuonnin suhteen. [25] Kuvassa 15 esitetään vertailukelpoisella energiamäärällä hitsattu yksipuoleinen piena kaarihitsaamalla (jauhekaari tai MIG/MAG), laserhybridihitsaamalla ja laserhitsaamalla toteutettuna.



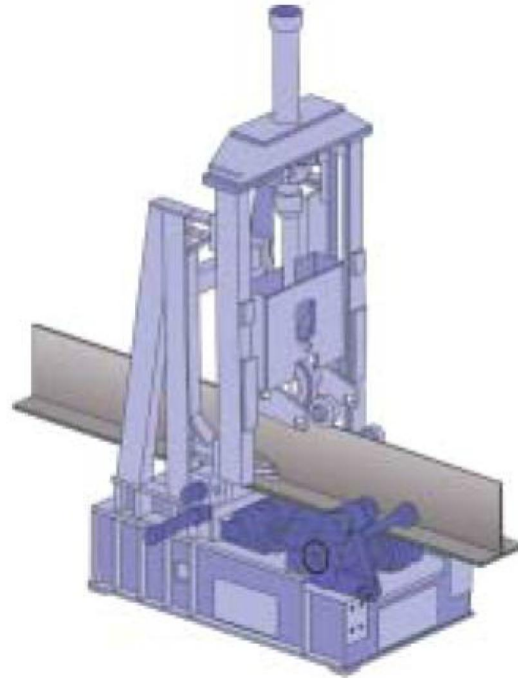
Kuva 15. Vasemmalta oikealle: kaarihitsaus, laserhybridi, laser. Hitsaaminen suoritettu vertailukelpoisella energiamäärällä. [26]

Kuvassa 16 on esitetty laserhitsaamalla hitsattujen yksipuoleisten T-liitosten pienahitsien poikkileikkauksia eri hitsausnopeuksilla. Kuvista nähdään, että pienemmällä hitsausnopeudella, eli suuremmalla lämmöntuonnilla per mittayksikkö, tunkeuma ja HAZ ovat suurempia.



Kuva 16. Hitsausnopeuden vaikutus hitsausjälkeen laserhitsaamalla. Yksipuolinen piezohitsi T-liitoksessa. [27]

Hitsausaseman tyypillä on merkitystä syntyviin muodonmuutoksiin käytetyn hitsausprosessin lisäksi. Hitsausasema vaikuttaa hitsattavan kappaleen hitsaamisen aikaisiin kiinnityksiin ja siihen mahdollisesti aiheutettaviin hitsausprosessin ulkopuolisiin voimiin. Esimerkiksi kuvassa 17 esitetään ESAB:n läpivirtaava T-palkin hitsausasema. Jos uumalevy silloitushitsataan kiinni laippalevyyn vain alkupäästään, syntyvät hitsausmuodonmuutokset ovat erilaiset kuin tapauksessa, jossa uumalevy olisi silloitushitsattu kiinni laippaan molemmista päistään, sillä nyt läpivirtaavassa koneessa hitsattavat levyt pääsevät lämpölaajenemaan toistensa suhteen hitsaamisen aikana. Tämä on hyvä ominaisuus muodonmuutosten hallinnan näkökulmasta, sillä differentiaalilämmityksellä eli toista osaa enemmän lämmittämällä voidaan suhteellisen helposti vaikuttaa hitsauksen seurauksena syntyviin muodonmuutoksiin jo hitsauksen aikana. Käytännössä konetyypillä vaikutetaan siis hitsaamisen reunaehtoihin. [28]



Kuva 17. Läpivirtaava T-palkin hitsausasema [29]

Hitsausasema voi kohdistaa hitsattavaan kappaleeseen mekaanisia voimia termisten voimien lisäksi. Työstettävää kappaletta voidaan esimerkiksi painaa tai venyttää mekaanisesti hitsaamisen aikana, jolloin kappaleeseen syntyvä jännitystila jää pysyväksi kappaleiden hitsauduttua yhteen ja näin vaikuttaa kappaleen lopulliseen muodonmuutostilaan. Itse hitsaamisen ulkopuolisiin muodonmuutosten hallintakeinoihin syvennyttään tarkemmin luvussa 3.1.

3. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN HALLINTA

Jäännösjännitysten ja muodonmuutosten hallintaan on olemassa monia eri keinoja. Keinot voivat olla hitsausparametreihin ja hitsaamisen reunaehtoihin vaikuttavia toimenpiteitä tai työstettävään kappaleeseen ulkoisia voimia aiheuttavia toimenpiteitä. Yleisiä muodonmuutosten ja jäännösjännitysten hallintatapoja ovat kiinnittimien käyttö, symmetrian hyödyntäminen, lämmöntuonnin muuttaminen ja tätä kautta hitsin koon muuttaminen ja hitsausnopeuden muuttaminen. [7, 14] Käytännössä siis erilaiset tuennat ja hitsausparametrien valinta vaikuttavat hitsaamisessa syntyviin muodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin. Hitsaus-, materiaali- ja geometriaparametrien vaikutus hitsausmuodonmuutoksiin on todennettu simulointimallien ja aiheesta tehtyjen tutkimuksien avulla luvussa 5. Tässä luvussa keskitytään pääasiassa materiaalista, geometriasta ja hitsausparametreista riippumattomiin, ulkoisiin muodonmuutosten hallintakeinoihin, kuten kiinnittimien käyttöön, esi- tai jälkilämmittämiseen ja esijännittämiseen.

Menetelmien soveltamisessa kannattaa olla tarkkana, sillä vaikka jotakin tapaa hyödyntäessä haluttu muodonmuutostyyppi voidaan saada pienemmäksi, samalla jokin toinen muodonmuutostyyppi voi kasvaa. Esimerkiksi hitsausnopeutta kasvattamalla tai hitsaustehoa vähentämällä T-palkin kaareutuma pienenee, mutta jos laipan paksuus on juuri epäedullisella alueella, toimenpiteen seurauksena kulmavetäymä kasvaa. Pelkästään huolellisella hitsausparametrien valinnalla voidaan vaikuttaa muodonmuutoksiin merkittävästi.

Kiinnittimien käyttö on eräs laajalti käytetty ja yksinkertainen menetelmä muodonmuutosten hallitsemiseksi. Kiinnittimiä käyttämällä voidaan tehokkaasti rajoittaa lähes kaikkia muodonmuutostyyppiä paitsi lommoutumista. Rajoittamalla kappaleen liikehdintä hitsauksen ja jäähtymisen aikana hitsausmuodonmuutoksien synty on estetty, mutta tällöin rakenteeseen voi muodostua huomattavasti suurempia jäännösjännityksiä kuin vapaammassa kappaleessa. Mikäli jäännösjännitykset kasvavat tarpeeksi suuriksi ja hitsattava rakenne on geometrialtaan tarpeeksi hoikka, voi lommoutuminen muodostua ongelmaksi. Lommoutumisen aiheuttaa puristava jäännösjännitys, joka ylittää rakenteen nurjahduskapasiteetin. Eulerin nurjahdustapausten mukaisesti globaalin nurjahduksen aiheuttava voima määritellään seuraavasti:

$$F_n = \mu \frac{\pi^2 EI_y}{L_n^2}, \quad (1)$$

jossa F_n on nurjahduksen aiheuttama voima, E on kimmokerroin, I_y on poikkileikkauksen neliömomentti, L_n on nurjahduspituus ja μ on tuennoista riippuva kerroin. Tuentakertoimen arvoja esitetään esimerkiksi lujuusopin oppikirjoissa [30].

Kaavasta (1) nähdään, että jäännösjännitysten (puristavan voiman) kasvaessa liian suureksi rakenne lommahtaa joka tapauksessa käytettiin kiinnityksiä tai ei, sillä kiinnitykset poistettaessa nurjahduspituus ja tuentakeroin muuttuvat samoiksi kuin tapauksessa, jossa kiinnityksiä ei käytetä. Samalla muut kaavan osat pysyvät muuttumattomina. Lisäksi kriittistä lommahduskuormaa laskettaessa tulee ottaa huomioon profiilista riippuvat paikalliset lommahdusilmiöt, kuten T-profiilin tapauksessa levykenttien lommahdus. On myös hyvä tiedostaa, että vaikka rakenne ei lommahda hitsaamisen jäljiltä, voivat kappaleeseen syntyneet jäännösjännitykset heikentää sen kapasiteettia huomattavasti riippuen rakenteen käyttötarkoituksesta eli siitä, minkä suuruista ja suuntaista kuormaa se tulee lopullisessa sijoituspaikassaan kannattelemaan ja miten rakenne siellä tuetaan.

Useammista hitseistä koostuvissa rakenteissa hitsausjärjestyksen valinta on olennaista. Hitsausjärjestyksellä vaikutetaan suoraan siihen, millaiset jäännösjännitykset ja tätä kautta muodonmuutokset hitsattavaan kappaleeseen jää. Esimerkiksi jäykistetyissä levykenttärakenteissa lopulliset muodonmuutokset riippuvat vahvasti jäykisteiden hitsausjärjestyksestä. [31]

3.1 Muodonmuutosten hallintamenetelmät

Muodonmuutosten hallintaan käytetyt menetelmät voidaan jakaa kolmeen kategoriaan sen perusteella, missä vaiheessa prosessia muodonmuutosten hallinta tapahtuu:

1. Ennen hitsausta
2. Hitsauksen aikana
3. Hitsauksen jälkeen

Ennen hitsaamista käytettyjä muodonmuutosten hallintamenetelmä on esimerkiksi muodonmuutosten ennakointi etukäteen luomalla kappaleeseen alkudeformaatio joko mekaanisesti tai lämmittämällä. Alkudeformaatio luodaan hitsauksen aiheuttamaa deformaatiota vastakkaiseen suuntaan, jolloin muodonmuutokset kompensoivat toisiaan ja lopputuloksena saavutetaan suurempi rakenne. Kappaleeseen aiheutettavan alkumuodonmuutoksen suuruus voidaan määrittää kokeellisesti, analyyttisesti arvioimalla tai simuloimalla. Ennen varsinaisten kappaleiden hitsaamista on myös mahdollista iteroida hitsausparametrien valintaa testikappaleiden hitsauksilla, mutta tämä on aikaa ja materiaalia kuluttavaa, mikä kasvattaa valmistuskustannuksia. Alkudeformaatio voidaan aiheuttaa esimerkiksi mekaanisesti tai termisesti venyttämällä tai taivuttamalla. [14]

Hitsaamisen aikana käytettyjä muodonmuutosten hallintamenetelmiä ovat esimerkiksi korotettu työlämpötila ja rakenteen esijännitys [14, 32]. Korotetulla työlämpötilalla nostetaan koko kappaleen lämpötila korkeaksi hitsauksen aikana, jolloin syntyvä lämpötilagradientti on suuruudeltaan huomattavasti pienempi ja täten aiheuttaa vähemmän muodonmuutoksia. Esijännittämisellä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi venytetään palkkia mekaanisesti hitsauksen aikana, jolloin kappaleessa olevat vetojännitykset pienentävät hitsauksen synnyttämiä puristavia jäännösjännityksiä. Molemmat menetelmät ovat epäkäytännöllisiä suurille kappaleille, sillä suurien rakenteiden lämmittäminen vaatii massiivisia uuneja ja esijännittäminen mekaanisesti vaatii merkittävän suurta voimia. Esijännittäminen on myös geometrisesti monimutkaisille rakenteille haastavaa. Eräs mielekäs hitsaamisen aikana hyödynnettävä menetelmä on liikkuva differentiaaliesilämmitys; tähän menetelmään perehdytään tarkemmin luvussa 3.2 ja sitä on sovellettu tämän työn testi-hitsauksissa sekä simulaatiomalleissa. Taloudellisesta näkökulmasta muodonmuutosten hallinta hitsauksen aikana on paras vaihe hallita muodonmuutoksia, sillä se ei tuota valmistukseen lisäaikaa siinä määrin missä muissa työvaiheissa. [14]

Hitsaamisen jälkeen yleisesti käytettyjä hallintamenetelmiä ovat mm. ”kuumilla” eli lo-kaaleilla lämmönlähteillä muodonmuutosten oikominen ja hitsauksen jälkeinen työstäminen. Kuumilla oikoessa syntyneitä muodonmuutoksia oikaistaan aiheuttamalla keskiteylle alueelle korkeampi lämpötila, jonka aiheuttamat muodonmuutokset kompensoivat kappaleeseen syntyneitä muodonmuutoksia. Vastaavasti työstämällä eli materiaalia poistamalla voidaan päästä hyväksyttävään muodonmuutostilaan. Hitsauksen jälkeiset toimenpiteet ovat siitä epäedullisia tapoja hallita muodonmuutoksia, että ne voivat lisätä tai ”laukaista” jäännösjännityksiä, jolloin rakenteen kapasiteetti mahdollisesti pienenee ja muodonmuutokset voivat jopa kasvaa jälkikäsitelyn seurauksena. Jälkikäteen tehdyt korjaavat toimenpiteet niin ikään lisäävät valmistukseen kuluvaan aikaa. [5,7]

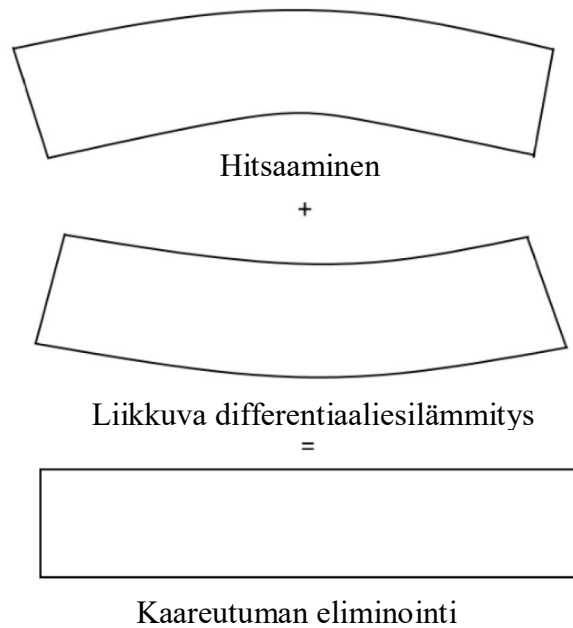
Vähemmän tunnettuja ja käytettyjä menetelmiä muodonmuutosten ja jäännösjännitysten hallinnassa ovat VSR (vibratory stress relieving) ja elektromagneettinen vasarointi. VSR:n tarkoituksena on pienentää jäännösjännityksiä ja hitsausmuodonmuutoksia pakottamalla hitsattu kappale värähtelemään joko sen resonanssitaajuudella tai sen ulkopuolella taajuudella. Menetelmä perustuu kappaleeseen hitsaamisen johdosta jäävien plastisten venymien pienentämiseen. *Resonanssitaajuuden ulkopuolisen värähtelyn* tehokkuus jäännösjännitysten ja muodonmuutosten vähentämiseen riippuu kappaleeseen aiheutettavan värähtelyn amplitudista, ei värähtelyajasta. Mitä suurempi värähtelyamplitudi, sitä enemmän pienennetään jäännösjännityksiä. *Resonanssitaajuudella* VSR:ää hyödynnettäessä on tärkeää tietää rakenteen värähtelymuotoa vastaava ominaisuusmuoto ja -taajuus, joiden tulee vastata kappaleeseen indusoitavaa värähtelyä. Resonanssitaajuudella värähtelyn amplitudin ei tarvitse välttämättä olla suuri, koska resonoinnilla on prosessia vahvistava vaikutus. Tämän johdosta se soveltuu paremmin esimerkiksi suurien rakenteiden jäännösjännitysten ja muodonmuutosten hallintaan, koska kappaleeseen vaikuttavan, väräh-

telyn aiheuttavan voiman ei tarvitse olla yhtä suuri kuin resonanssitaajuuden ulkopuoleissa värähtelyssä. [33] Värähtelyyn käytettävä aika resonanssitaajuutta hyödynnettäessä riippuu karkeasti työstettävän kappaleen massasta; tyypillinen kesto prosessille on 10–30 minuuttia. Etuna menetelmässä on sen edullisuus, sillä se ei vaadi kallista laitteistoa ja on prosessina suhteellisen vähän aikaa kuluttava. VSR:n toimintamekanismia ei kuitenkaan ymmärretä teollisuudessa täysin, minkä takia sitä pidetään vielä nykyäänkin epäluotettavana metodina ja sitä ei ole sovellettu teollisesti kovin suurella mittakaavalla. [7]

Elektromagneettisella vasaroinnilla suoristetaan materiaalia hyödyntäen elektromagneettisia voimia. Tämän johdosta paremmin sähköä johtavat materiaalit deformatuvat enemmän kuin vähemmän sähköä johtavat materiaalit samalla energiamäärällä menetelmää hyödynnettäessä, koska matalan konduktiivisuuden materiaaleilla energiaa hukkuu enemmän lämmöntuottoon kappaleen sisällä. Käytännössä menetelmä soveltuu hyvin esimerkiksi alumiinirakenteiden muodonmuutosten hallintaan. [7]

3.2 Liikkuva differentiaaliesilämmitys

Tilannetta, jossa kahdesta kappaleesta koostuvassa hitsatussa rakenteessa toista kappaletta lämmitetään toista kappaletta enemmän hitsauksen aikana, kutsutaan differentiaalilämmitykseksi [7]. Enemmän lämmitetty kappale laajenee toista kappaletta enemmän ja jäähtyessään jää kappaleista pidemmäksi, koska kappaleet on hitsattu yhteen ja lyhyempi kappale on jo palautunut alkuperäiseen pituuteensa estäen pidemmän kappaleen täydellisen palautumisen. Prosessista aiheutuvat jäännösjännitykset vaikuttavat lopulliseen rakenteen muodonmuutostilaan. Menetelmän toimivuuden edellytyksenä on, että kappaleet pääsevät lämpölaajenemaan toisiensa suhteen, eli esimerkiksi T-palkkien tapauksessa ne eivät saa olla silloitushitsattuja toisiinsa ennen hitsausta molemmista päistään. Kuvassa 18 esitetään esimerkki tapauksesta, jossa T-liitoksen uumalevyä esilämmitetään ennen hitsausta. Esilämmitys aiheuttaa hitsausmuodonmuutoksia vastakkaisuuntaisen muodonmuutostilan uumalevyyn, mikä suoristaa lopullista rakennetta.

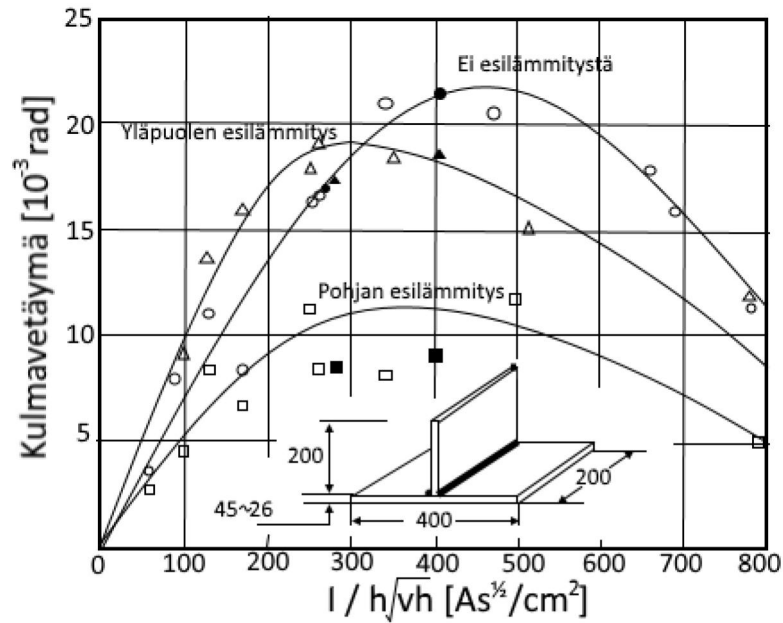


Kuva 18. Esimerkki differentiaalilämmityksen vaikutuksesta T-liitoksen uumalevyn muodonmuutoksiin [14].

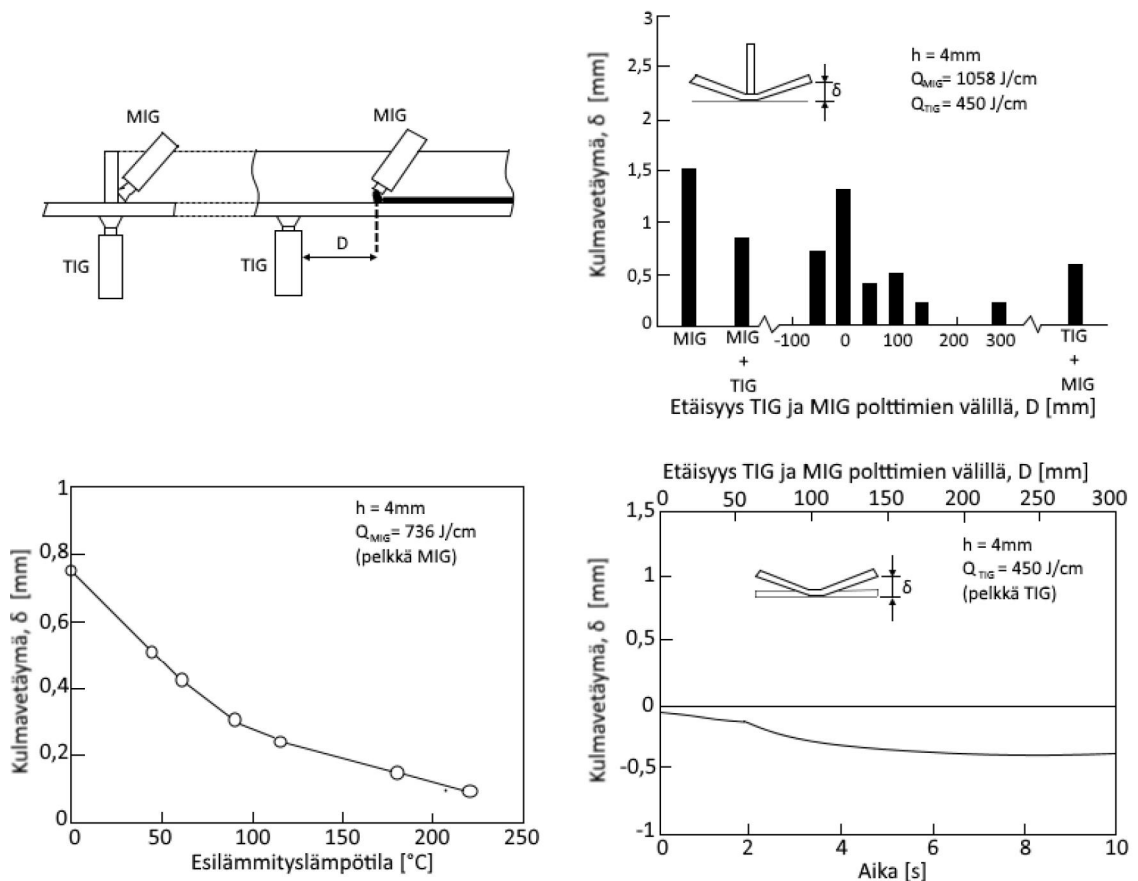
Menetelmä soveltuu hieman sovellettuna teollisuustarkoituksiin hyvin, kun lämmitys tuodaan lokaalisti yhteen kappaleeseen ja lämmitystä liikutetaan hitsauksen mukana. Tätä menetelmää kutsutaan liikkuvaksi differentiaalilämmitykseksi [14]. Lämmitys voidaan toteuttaa esimerkiksi liekki- tai kaasupolttimien avulla, kuten Deon ja Mochizukin tutkimuksissa [14].

Esilämmityksen teho ja sijainti valitaan riippuen siitä, mihin muodonmuutostyyppiin halutaan vaikuttaa. Esimerkiksi kulmavetäymän minimoinnissa halutaan tasata lämpöjakaumaa laipan paksuuden yli, jolloin kappaletta halutaan lämmittää hitsausta vastakkaiselta puolelta, kuten esitetään kuvassa 19. Tällä on kuitenkin negatiivinen vaikutus palkin kaareutumiaan, sillä lämpöä tuodaan nyt pelkkää hitsausta enemmän vetojäykkyysskeskiön alapuolelle. Suurempi lämmöntuonti johtaa suurempiin venymiin, mikä puolestaan johtaa suurempaan kaareutumiaan. Lisäksi laippalevy lämpölaajenee uumalevyä enemmän, jolloin se kutistumaan pyrkiessään tehostaa kaareutumista entisestään.

Laipan alapuolinen esilämmitys vaikuttaa kulmavetäymään kahdella tavalla. Toisaalta terävä lämmitys aiheuttaa plastisia venymiä laipan alapinnalle, joka tasapainottaa laipan paksuuden yli syntyviä lämpövenymiä, ja toisaalta esilämmitys ennen hitsausta pienentää lämpötilagradienttia (eli lämpötilaeroa ylä- ja alapinnan välillä), jolloin hitsauksesta syntyvät plastiset venymät jakautuvat tasaisemmin ainevahvuuden yli. Tästä syystä laipan alapuolinen lämmitys kannattaa toteuttaa ennen hitsausta, jotta myös esilämmitysefektistä saatavat edut voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti eli lämmitettäessä käytettävää tehoa pystytään laskemaan. Mitä lähempänä hitsausta esilämmitys suoritetaan, sitä suurempi osuus esilämmitysilmiöllä on hitsausmuodonmuutosten eliminoinnissa laipan alapuolisessa lämmityksessä. Esilämmityksen ja hitsauspisteen välisen etäisyyden vaikutusta kulmavetäymään havainnollistetaan kuvassa 20. [14]

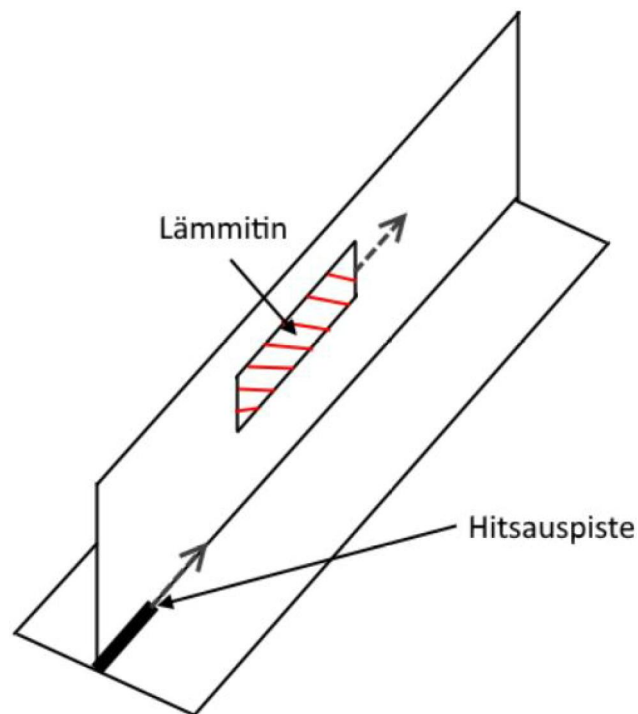


Kuva 19. Laipan esilämmittämisen vaikutus kulmavetäymään. Tutkimuksessa käytetty esilämmityksen lämpötila noin 200 °C. [34]



Kuva 20. Esilämmityslämpötilan sekä hitsauspisteen ja esilämmityksen välisen etäisyyden vaikutus kulmavetäymään. [14]

Kaareutumaa voi vastaavasti pienentää lämmittämällä uumalevyä kuten kuvassa 21 esitetään, jos uumaa ja laippaa ei ole silloitushitsattu toisiinsa kiinni molemmista päistään ennen hitsausta. Uumaa tarpeeksi esilämmittämällä se lämpölaajenee palkin pituussuunnassa laippalevyä enemmän ja jäähtyessään kutistuu enemmän, pienentäen kaareutumaa [14]. Mikäli kappaleet on silloitushitsattu molemmista päistään yhteen, vetojäykkyysskeskiön yläpuolisella terävällä lämmityksellä kappaleeseen voidaan aiheuttaa plastisia venymiä, jotka taivuttavat rakennetta vastakkaiseen suuntaan kuin hitsien ja alapuolisen lämmityksen aiheuttamat venymät, koska lämmitys tapahtuu vetojäykkyysskeskiön vastakkaiselta puolelta. Jännösjäännityksistä aiheutuvat kappaleen sisäiset voimat taivuttavat tällöin rakennetta vastakkaisiin suuntiin lämmitetyiltä alueilta. Tämä vaatii kuitenkin terävää lämmöntuontia sekä varmistumista rakenteen stabiiliudesta jännösjäännitysten aiheuttamille kuormituksille. [29]



Kuva 21. Liikkuva differentiaalilämmitys T-palkin uumassa

Mikäli kappaleet on silloitushitsattu toisiinsa vain toisesta päästään, eli ne pääsevät lämpölaajenemaan toistensa suhteen, on uumalevyn lämmittäminen sen alareunasta hyvä keino kaareutumien eliminoinemiseksi. Tällöin alareuna lämpiää muuta levyä enemmän, aiheuttaen uumalevyllä hitsausmuodonmuutoksiin nähden vastakkaisuuntaista kaareutumaa jo ennen hitsaamista. Tämän jälkeen vähemmän jäykkä laippalevy painetaan kaareutuneeseen uumaan kiinni ja osat hitsataan yhteen, jolloin rakenteen alkutila on valmiiksi kaareva hitsaamisesta syntyviä muodonmuutoksia vastakkaiseen suuntaan. Tällöin periaatteessa luodaan alkudeformaatio hitsauksen aikana. Haasteena menetelmässä on se, että palkki saattaa kaareutua esilämmityksen ansiosta merkittävästi, mikä saattaa aiheuttaa käytännön haasteita itse hitsausprosessissa.

3.3 Simuloinnin hyödyntäminen

Simulointia käytetään teollisessa mittakaavassa varsin vähän hitsausmuodonmuutosten määrittämisessä, vaikka tutkimuksia aiheesta on tehty kattavasti, kuten jo tässä työssä käytettyjen lähteiden määrästä voidaan päätellä. Tämä johtuu tarvittavaan tarkkuuteen kykenevien simulointimallien monimutkaisuudesta, joka johtaa pitkään laskenta-aikaan. Lisäksi monien materiaalien materiaaliominaisuudet lämpötilan funktiona ovat vaikeasti saatavilla olevaa tietoa, mikä on yksi simuloinnin kompastuskivistä. Mitä tarkempaan lopputulokseen simulointien avulla halutaan päästä, sitä monimutkaisempia ja raskaampia laskentamalleista tulee.

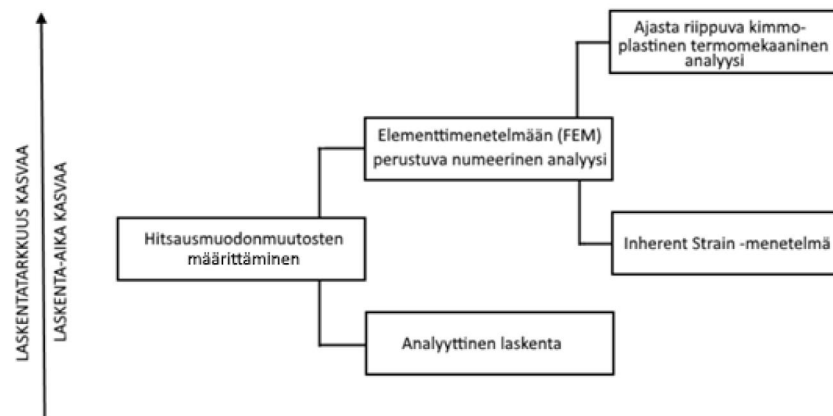
Tietokoneiden laskentatehon kasvaessa simuloinnin hyödyntäminen hitsausmuodonmuutosten määrittämisessä muodostuu kuitenkin mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi ja aiheesta on ilmestynyt kasvavissa määrin tutkimustietoa 2000-luvun edetessä. Tämä voidaan päätellä siitä, että suurin osa tässäkin työssä käytetyistä lähteistä on julkaistu 2000-luvulla ja osa vasta viime vuosina; aihe on yhä tiiviin tutkimustyön alainen. Hitsausprosessin simulointi mahdollistaa sen, että voidaan määrittää hitsattavaan rakenteeseen syntyvät muodonmuutokset ja jäännösjännitykset etukäteen ja määrittää mahdollisesti tarvittavien korjaavien toimenpiteiden vaikutus muodonmuutoksiin. Simulointia voidaan siis käyttää työkaluna sopivien hitsausparametrien valinnassa ja sen avulla pystytään määrittämään myös muodonmuutoksia korjaavien toimenpiteiden, kuten esimerkiksi esilämmityksen parametrit ennen todellista hitsausta. Simulaatiomallien avulla voidaan testata tai jopa optimoida [35] haluttuja parametreja ja saavuttaa toivottu muodonmuutostila ilman fyysisten hitsaustestien aiheuttamaa materiaali- ja aikahävikkiä [4].

Tässä työssä tarkastellaan T-palkin hitsausmuodonmuutosten määrittämistä simuloimalla hitsausprosessia numeerisesti ANSYS Mechanical 19.0 FEM-ohjelmistolla. Simuloinnin avulla määritetään esilämmitysten vaikutus muodonmuutoksiin. Simulaatiomalleilla saatuja hitsausmuodonmuutoksia verrataan sen jälkeen kokeellisiin mittaustuloksiin, joiden avulla verifioidaan laskentamallin toimivuus. Itse simuloinnin toteutukseen perehdytään luvussa 4 ja simulaatiomallien antamiin tuloksiin keskitytään luvussa 5. Lisäksi esitellään aiheesta tehtyjen tutkimuksien pohjalta jäännösvenymämenetelmään perustuva laskentamalli, jota voidaan hyödyntää suurempien rakenteiden hitsausmuodonmuutosten simuloinnissa.

4. MUODONMUUTOSTEN LASKENNALLINEN MÄÄRITTÄMINEN

Tässä luvussa perehdytään hitsausmuodonmuutosten laskennalliseen määrittämiseen. Elementtimenetelmään perustuvista yleisimmin käytetyistä laskentatavoista erityiseen tarkasteluun otetaan ajasta riippuva termomekaaninen kimmoplastinen analyysi sekä jäännösvenymämenetelmä. Näiden lisäksi esitellään lyhyesti myös muita hitsausmuodonmuutosten määrittämisessä käytettyjä laskentatapoja.

Elementtimenetelmään perustuvista simulaatiomalleista voidaan todeta ajasta riippuvan, kimmoplastisen termomekaanisen analyysin antamien tulosten vastaavan sekä tässä työssä, että aiheesta tehdyissä tutkimuksissa [36, 37] tehtyjä kokeellisia mittauksia parhaiten, mutta se on ajallisesti eniten aikaa kuluttava ja laskentatehovaatimuksiltaan vaativin mallinnustapa. Yksinkertaistetut menetelmät säästävät aikaa, mutta mitä enemmän yksinkertaistuksia tai yleistyksiä tehdään, sitä enemmän menetetään laskentatarkkuudessa. Lisäksi yksinkertaistettu menetelmä saattaa vaatia ratkaistun ajasta riippuvan kimmoplastisen termomekaanisen analyysin ratkaisun esitiedokseen, mikäli halutaan päästä riittävän tarkkoihin tuloksiin. Kuvassa 22 esitetään analyysien tarkkuuden ja laskentaajan keskinäinen vertailu karkealla tasolla.



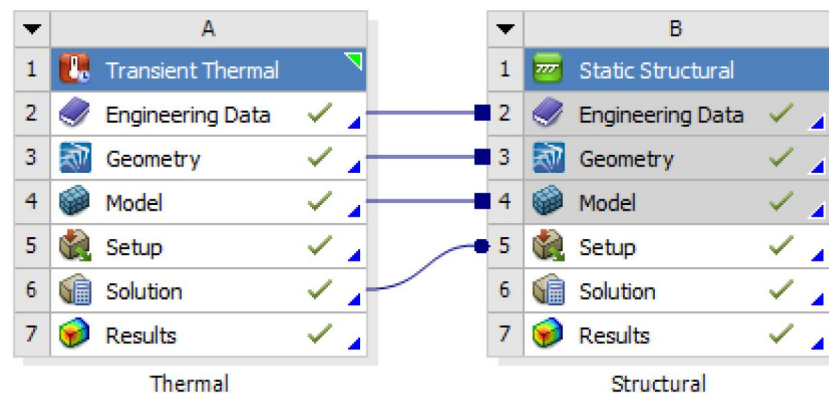
Kuva 22. Hitsausmuodonmuutosten määrittämisessä käytettyjä laskentamenetelmiä

Tässä työssä luoduissa laskentamalleissa on oletettu, että hitsin materiaali on samaa kuin perusaineen. Materiaalin oletetaan olevan koko tilavuudeltaan homogeenista ja toisiinsa hitsattavien kappaleiden esijännityksettömiä, mittatarkkoja ja suorita. Pienahitsi idealisoidaan poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen kolmion muotoiseksi, eli tunkeumaa ei oteta laskentamalleissa huomioon. Hitsin mitat määritetään hitsausparametrien perusteella. Lämmön oletetaan jakautuvan tasan koko hitsin poikkileikkaukseen, josta kaikki lämpö siirtyy johtamalla levyihin. Faasimuutoksia ei oteta huomioon muuten kuin ajasta riippuvan kimmoplastisen termomekaanisen analyysin lämpölaajenemiskertoimessa.

4.1 Ajasta riippuva kimmoplastinen termomekaaninen analyysi

Ajasta riippuva kimmoplastinen termomekaaninen analyysi (TEPA, engl. Transient Thermal-Elastic-Plastic Analysis) on yleisesti tarkkuudeltaan parhaimpana pidetty menetelmä, koska se ottaa huomioon liikkuvan lämmönlähteen, materiaaliominaisuudet lämpötilan funktiona ja jopa tarkimmissa analyyseissa faasimuutokset hitsausalueella. Menetelmää ei kuitenkaan voida soveltaa ainakaan toistaiseksi moniin teollisuuden tarkoituksiin sen vaatiman suuren laskenta-ajan vuoksi. [20] Tämän työn puitteissa faasimuutosilmiöitä ei ole otettu huomioon, koska niiden vaikutus matalahiilisten terästen muodonmuutokseen on pieni [12, 21, 37].

Analyysin ideana on ratkaista ongelma kahdessa vaiheessa: aluksi ratkaistaan lämpötilajakauma ajan suhteen hyödyntäen ajasta riippuvaa termistä analyysia, jonka jälkeen laskettu lämpötilajakauma syötetään lähtötietona mekaaniseen malliin. Käytännössä mekaanisessa analyysissa termisestä analyysista saadun lämpötilajakauman avulla voidaan määrittää kappaleeseen aiheutuvat lämpöjännitykset ja -venymät. Periaatekuva mallien linkityksestä esitetään kuvassa 23. Mekaanisen mallin tuloksista voidaan lopuksi lukea hitsausprosessin kappaleeseen aiheuttamat jäännösjännitykset sekä muodonmuutokset. Analyysi on luonteeltaan materiaaliltaan epälineaarinen materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuuden ja myötölujittuvan materiaalmallin vuoksi.



Kuva 23. Mallien linkitys ANSYS Mechanical R19.0 -ohjelmistossa. Termisen analyysin ratkaisu syötetään rakenneanalyysin lähtötiedoiksi.

Termisen analyysin lähtötiedoiksi tarvitaan hitsattavan geometrian dimensioiden lisäksi hitsausparametrit sekä termiset materiaaliominaisuudet lämpötilan funktiona. Hitsausparametreihin lukeutuvat tuotu lämpö, jonka voi lukea joko suoraan hitsauslaitteesta tai määrittää hitsauksen termisen hyötösuhteen, jännitteen, sähkövirran ja hitsausnopeuden avulla. Tuodun hitsaussulan tilavuuden voi arvioida hitsauslangan paksuuden, langansyöttönopeuden ja hitsausnopeuden avulla. Lämpö tuodaan kyseiselle tilavuudelle las-

kentamallissa. Materiaaliominaisuuksista tulee määrittää lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, lämpölaajenemiskerroin ja tiheys lämpötilan funktiona. Lisäksi malliin tulee määrittää lämmönsiirtymiskerroin, joka kuvaa pinnan ja väliaineen (tässä tapauksessa liikkumaton ilma) välistä tehonsiirtoa, eli kuinka tehokkaasti lämpöä luovutetaan teräksen pinnasta ilmaan. Periaatteessa statiikkamalli tulisi linkittää takaisin termiseen malliin, koska mekaaniset venymät luovat lämpöä, mutta niiden vaikutus voidaan olettaa merkityksettömäksi hitsaamisen aiheuttamaan lämmöntuontiin verrattuna. Tällöin ne jätetään ottamatta huomioon ja mallien keskinäinen linkitys toimii vain yhteen suuntaan. Käytännössä hitsaamiseen liittyy vielä monta muuta erilaista fysikaalista prosessia, mutta tehdyt yksinkertaistukset ovat kelvollisia useimpia hitsausprosesseja mallinnettaessa. [14, 37]

Lämpötilan muutos lasketaan Fourierin lain differentiaalisessa muodossa kaavalla

$$q/A = -k\nabla T, \quad (2)$$

jossa q/A on paikallinen lämpövuoto, k on materiaalin lämmönjohtavuus ja ∇T on lämpötilagradientti. Lämmönjohtavuus k on lämpötilasta riippuva ja isotrooppisissa materiaaleissa sen suuruus ei muutu spatiaalisesta sijainnista riippuen. Spatiaalisen sijainnin lisäksi muuttujat ovat myös ajasta riippuvia. Kolmiulotteisessa, ajasta riippuvassa analyysissä isotrooppiselle ja homogeeniselle materiaalille yhtälö on muotoa

$$\frac{\delta T(x,y,z,t)}{\delta t} = \frac{k}{c\rho} \nabla^2 T(x,y,z,t), \quad (3)$$

jossa c on materiaalin ominaislämpökapasiteetti ja ρ on materiaalin tiheys. Materiaaliominaisuudet ovat lämpötilasta riippuvia, ks. kuvat 25–27. [38]

Mekaanisen analyysin lähtötietoina tarvitaan tuentatyyppit, niiden sijainnit sekä mekaaniset materiaaliominaisuudet lämpötilan funktiona. Mitä rajoitetumpaa hitsattavan kappaleen muodonmuutoksien synty on, sitä suuremmat jäännösjännitykset kappaleeseen syntyvät. Tuentojen sijainti vaikuttaa myös syntyviin jäännösjännityksiin. Esimerkkilaskelmissa tuennat on pyritty pitämään vähäisinä ja isostaattisina, koska testihitsauksissa hitsattavia palkkeja ei ole kiinnitetty käytännössä mitenkään, jolloin tuenta tulee mallintaa laskentamalliinkin mahdollisimman vapaana. [37] Määritettäviin materiaaliominaisuuksiin lukeutuvat kimmokerroin, myötölujuus sekä Poissonin luku.

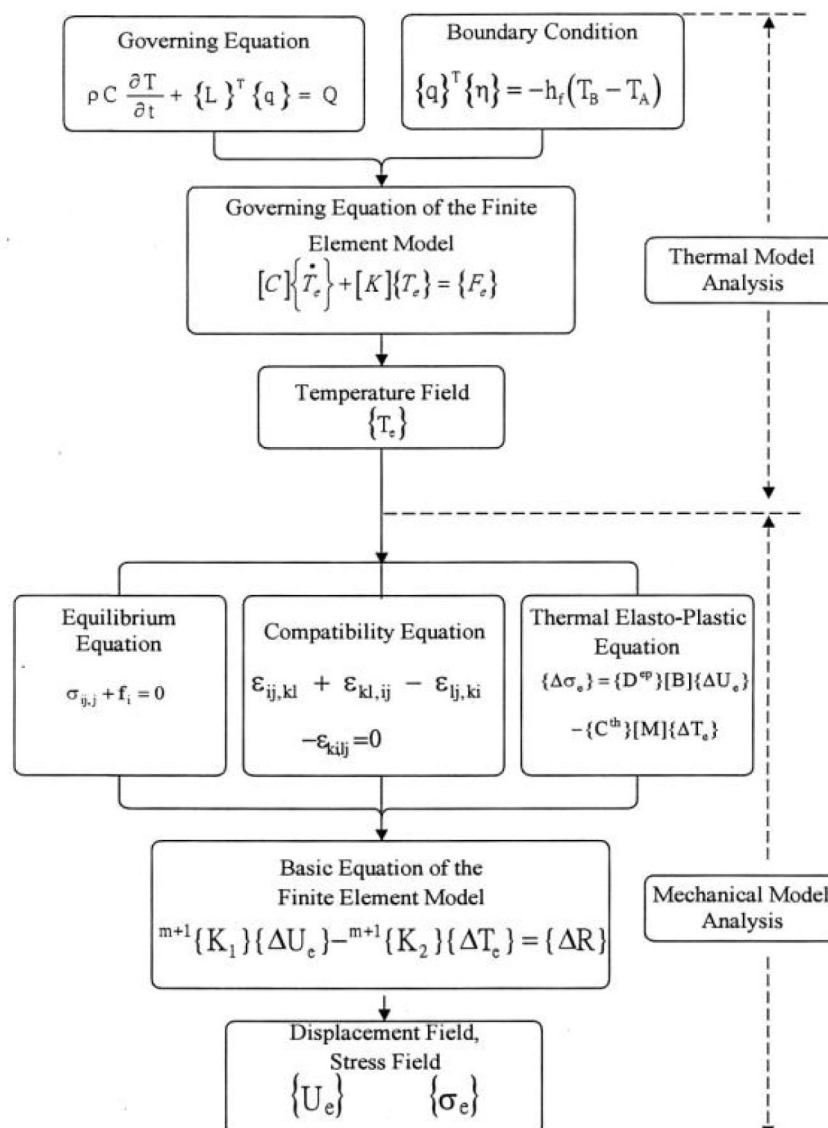
Mekaanisessa analyysissä termisestä analyysin ratkaisusta tuodusta lämpötilajakaumasta lasketaan lämpövenymät jokaisella aika-askeleella kaavalla

$$\varepsilon^{thermal} = \alpha(T - T_{\infty}) \quad (4)$$

jossa $\varepsilon^{thermal}$ on lämpövenymä, α on lämpölaajenemiskerroin, T on lämpötila ja T_{∞} on referenssilämpötila eli ympäristön lämpötila. Lämpövenymä lasketaan jokaiselle suunnalle x, y ja z erikseen, eli lämpölaajenemiskerroin voi olla eri suuruinen eri suuntiin mi-

käli materiaali ei ole isotrooppista, jolloin myös venymän suuruus suunnan suhteen vaihtuu. Teräksen tapauksessa riittää yhden lämpölaajenemiskertoimen määrittäminen, sillä teräs on isotrooppinen materiaali. [38]

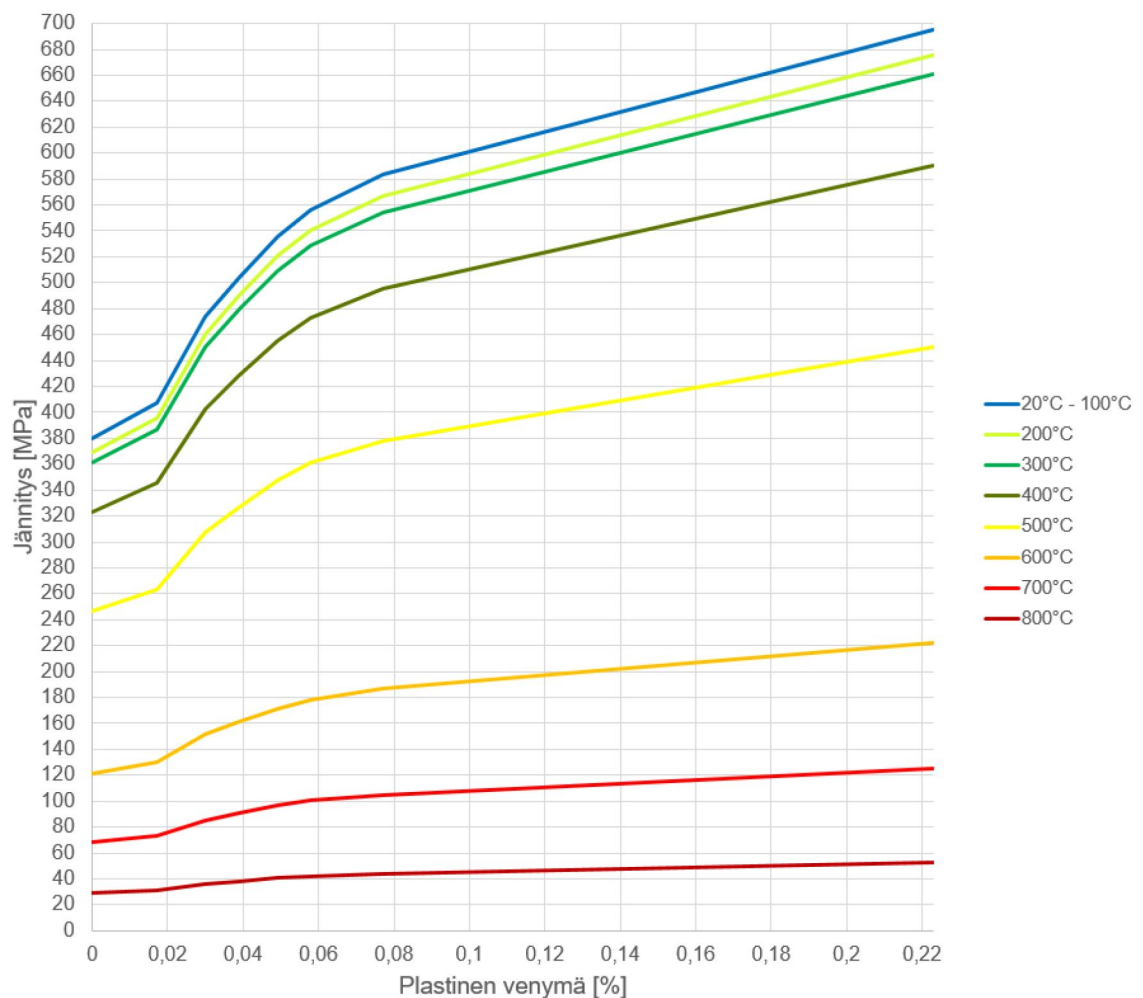
Mikäli lämpövenymistä aiheutuva jännitys ylittää myötölujuuden, syntyy kappaleeseen plastista venymää eli pysyvää venymää. Plastisen venymän suuruus määräytyy lämpötilan mukaan siten, että se palautuu lineaarisesti lasketusta jännityksestä elastisen alueen kulmakertoimen mukaisesti, ks. jännitys-venymäkäyrät kuvassa 25. [38] Jännösjännitykset ja pysyvät muodonmuutokset lasketaan rakenteeseen muodostuvista plastisista venymistä. Analyysiproseduuri noudattaa samaa kaavaa kuin Tengin [16] tutkimuksessaan käyttämä proseduri, joka esitetään kuvassa 24.



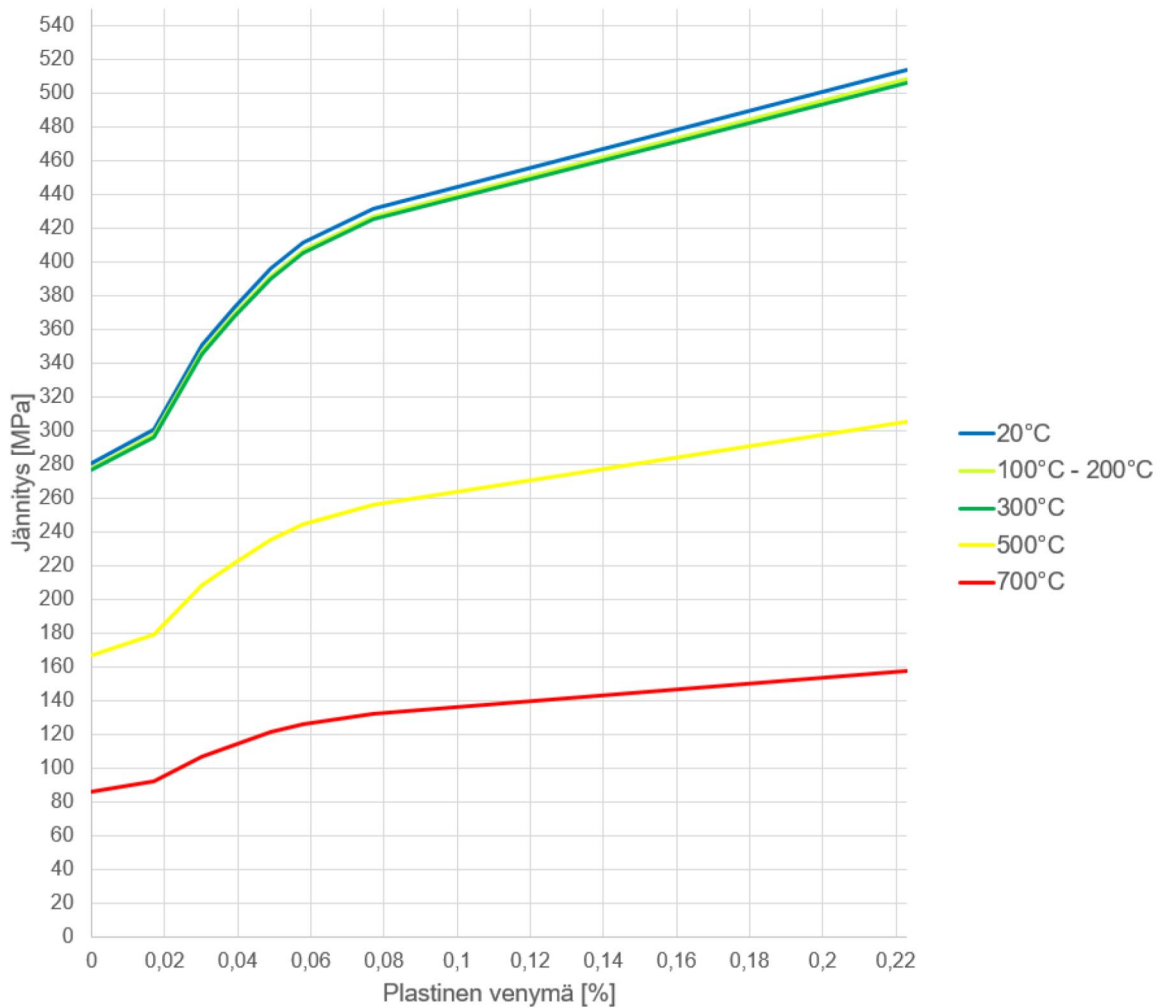
Kuva 24. TEPA -mallin laskentaproseduuri Tengin tutkimuksessa [16]

4.1.1 Materiaaliominaisuuksien määrittäminen ja materiaali-malli

Teräksen S355 mekaaniset materiaaliominaisuudet on määritetty isotrooppisesti myötölujittuvana, yleisesti simuloinnissa käytettävällä jännitys-venymäkäyrällä S355 teräkselle. Aalto-yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa on määritetty teräksen kimmokertoimen ja myötölujuuden lämpötilariippuvuus [39]. Tässä työssä jännitys-venymäkäyrät on skaalattu Aallon lämpötilamittaustuloksiin. Lämpölaajenemiskertoimen lämpötilariippuvuus on määritetty standardin SFS EN 12952-3 [40] mukaisesti, ottaen huomioon faasimuutosalue 700°C–900°C, jolloin lämpölaajenemiskerroin pienenee [9]. Teräksen S235 mekaaniset materiaaliominaisuudet lämpötilan funktiona on määritetty Skowrońskin tutkimuksessa [41], jonka tulokset on skaalattu käytettyyn jännitys-venymäkäyrään. Poissonin luvun lämpötilariippuvuus on jätetty ottamatta huomioon, koska sen vaihteluväli on hyvin pieni suurellakin lämpötila-alueella [12]. Myös tiheyden oletetaan pysyvän vakiona koko lämpötila-alueella. Käytetyt jännitys-venymäkäyrät eri lämpötiloissa esitetään kuvissa 24 ja 25 teräksille S355 ja S235.

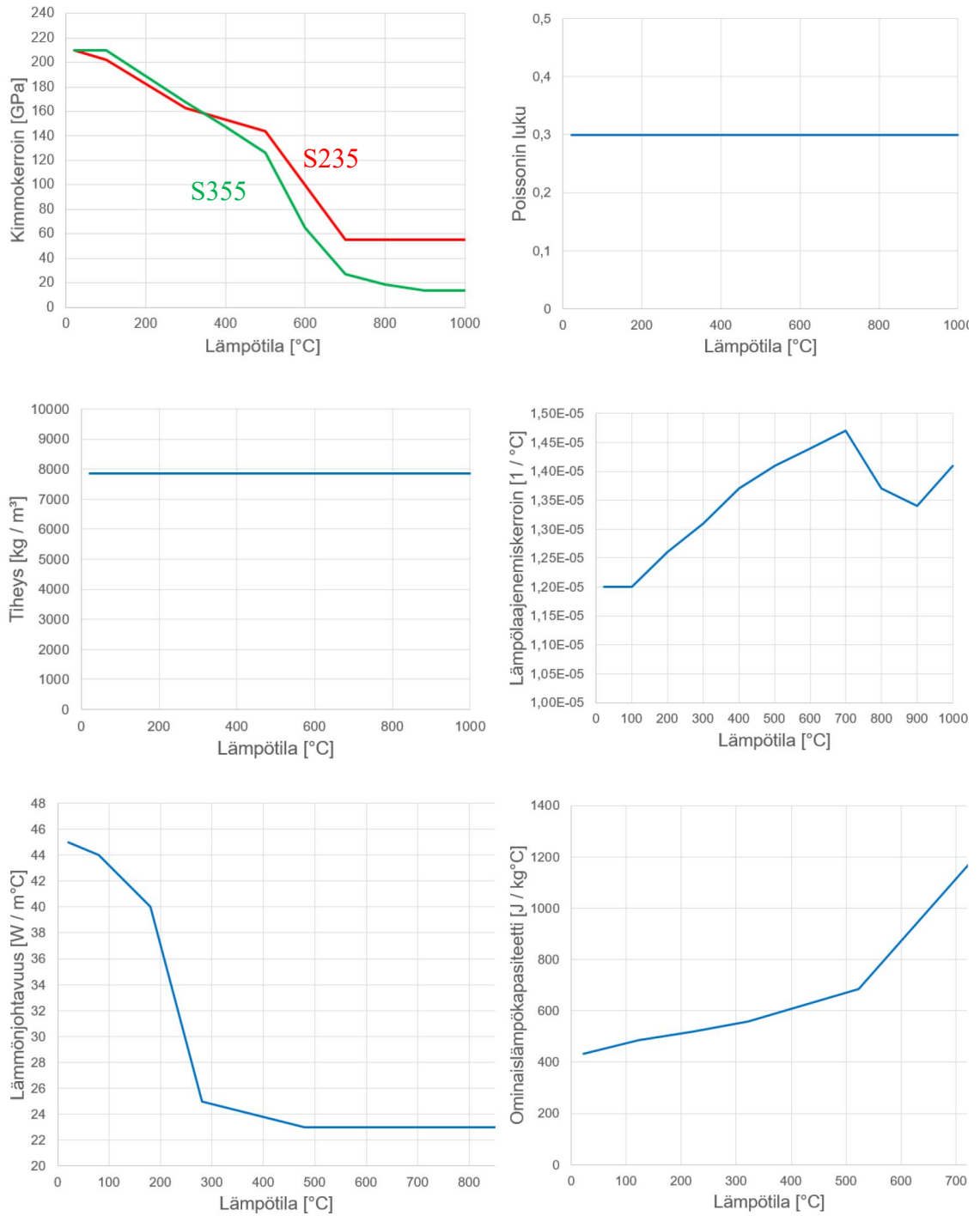


Kuva 25. Käytetyt jännitys-venymäkäyrät eri lämpötiloissa teräkselle S355 [39].



Kuva 26. Käytetyt jännitys-venymäkäyrät eri lämpötiloissa teräkselle S235 [39,41]

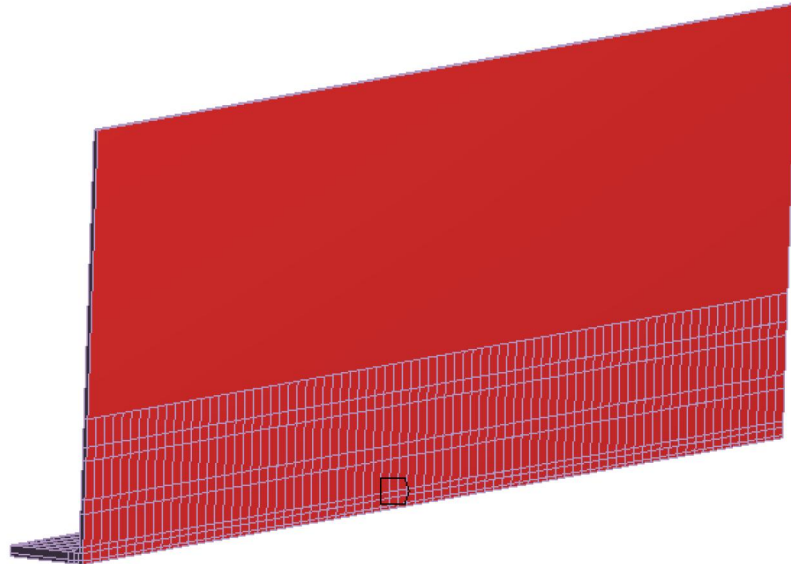
Termisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen pohjautuu kirjallisuuden [42] esittämiin taulukkoarvoihin teräkselle. Termiset materiaaliominaisuudet voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon teräksestä riippuen. Materiaaliarvoja on sovitettu testeissä käytettyä materiaalia vastaavammaksi lämpötilamittausten ja simulaatioiden pohjalta. Termisten materiaaliominaisuuksien määrittämistä ja esilämmityksessä kappaleeseen tuotavan tehon määrittämistä varten tehdyissä lämmitystesteissä teräslevyä lämmitettiin vakionopeudella liikkuvalla lämmönlähteellä toisella puolelta ja lämpötilaa mitattiin toiselta puolelta yhdestä pisteestä. Testit simuloitiin ANSYS Mechanical R19.0 FEM-ohjelmistolla ja termisiä materiaaliominaisuuksia iteroitiin niin, että päästiin mittaustuloksia vastaaviin lämpötilakäyriin erilaisilla kappaleeseen tuoduilla lämmöillä, jolloin materiaaliparametrien riittävästä tarkkuudesta voidaan olla vakuuttuneita. Molemmille analyyseissa käytetyille teräksille käytettiin samoja termisiä materiaaliominaisuuksia. Käytetyt mekaaniset ja termiset materiaaliominaisuudet lämpötilariippuvina esitetään kuvassa 27.



Kuva 27. Malleissa käytetty kimmokerroin, Poissonin luku, tiheys, lämpölaajenemiskerroin, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona. Materiaaliarvojen lämpötilariippuvuus on määritetty suoritettujen teräslevyjen lämmitystestien ja kirjallisuudessa esitettyjen arvojen avulla [42]. Faasimuutosten huomioon ottaminen näkyy lämpölaajenemiskertoimen pienenemisenä 700 °C – 900 °C välillä.

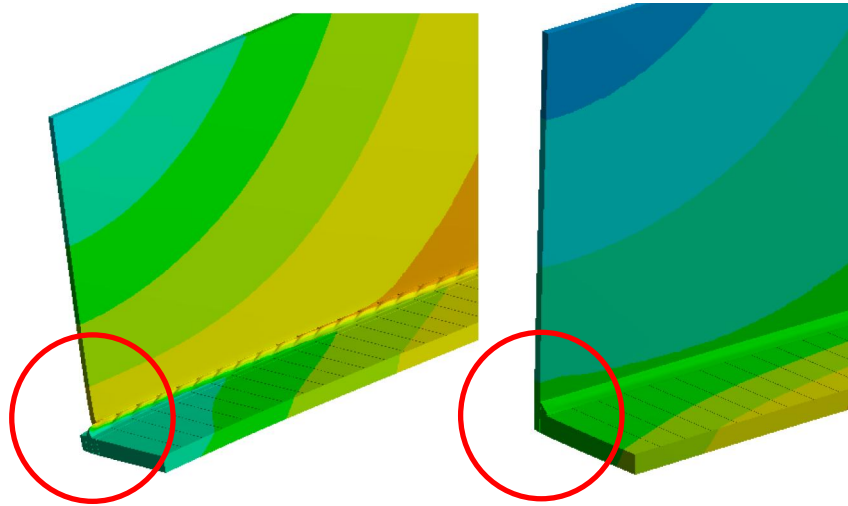
4.1.2 Mallinnustekniikka

Ensimmäinen asia mallinnustekniikkaa miettiessä on selvittää kappaleeseen vaikuttavat mekaaniset ja termiset voimat. Rakenteen, hitsaamisen ja mahdollisten tuentojen ja esilämmitysprosessien ollessa symmetrisiä ja samanaikaisia kannattaa malleissa käyttää symmetriareunaehto, joka lukitsee yhden vapausasteen laskentamallista ja keventää simulaatiota. Symmetrian soveltaminen T-palkeille esitetään kuvassa 28.



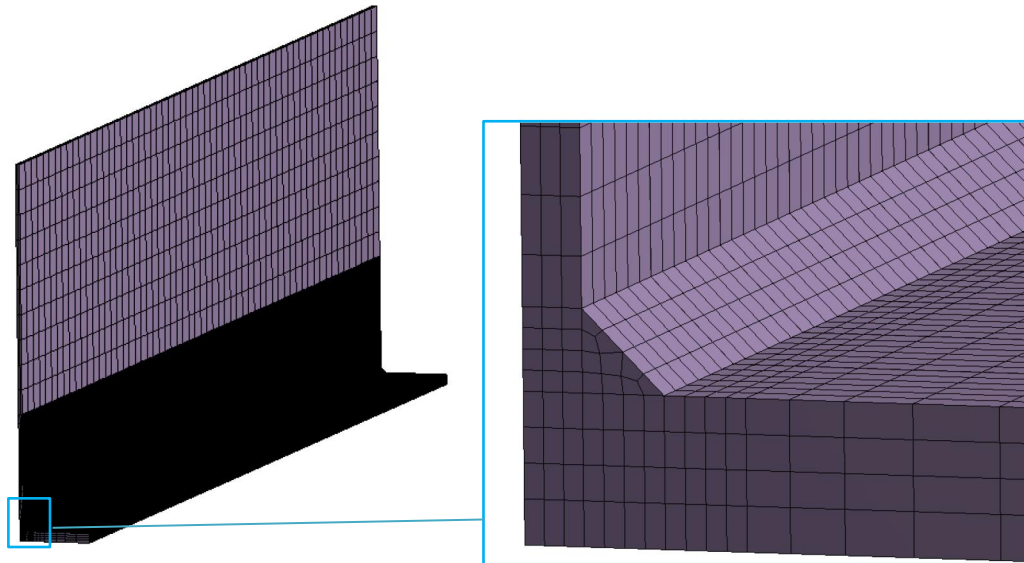
Kuva 28. Symmetrisiä rakenteita analysoitaessa kannattaa hyödyntää symmetriareunaehto. Kuvassa symmetriaa sovellettu T-palkkiin. Punainen pinta edustaa symmetriatasoa.

Mikäli kappale on yksinkertaisesti tuettu ja siihen ei vaikuta ulkoisia esilämmitys- tai esijännitysvoimia, voidaan hitsattavat kappaleet mallintaa simulaatioiden ja mittaustulosten keskinäisen vastaavuuden perusteella yhtenäisenä rakenteena. Yhtenäisenä rakenteena mallintaminen mahdollistaa luotettavammin määritetyn lämpötilajakauman, joka tehtyjen simulaatioiden perusteella parantaa mallin ratkaisuvarmuutta sekä vähentää laskenta-aikaa. Mikäli kappaleisiin kohdistuu esilämmitys- tai jännitysvoimia tai vain toiseen kappaleeseen kohdistuu mekaanisia kiinnityksiä, pääsevät kappaleet liikkumaan toistensa suhteen ennen hitsausta ja sen aikana, jolloin kaikkia muodonmuutosten ja jäännösjännitysten kannalta oleellisia ilmiöitä ei mahdollisesti saada mallinnettua yhteen verkotetun mallin avulla ja laskentatuloksen epätarkkuus kasvaa. Tällöin mallinnusprosessi on monimutkaisempi sekä aikaa kuluttavampi, koska kappaleiden suhteellinen lämpölaajeneminen toisiinsa nähden täytyy kyetä ottamaan huomioon laskentamallissa. Tilanteiden eroavaisuus havainnollistetaan kuvassa 29.



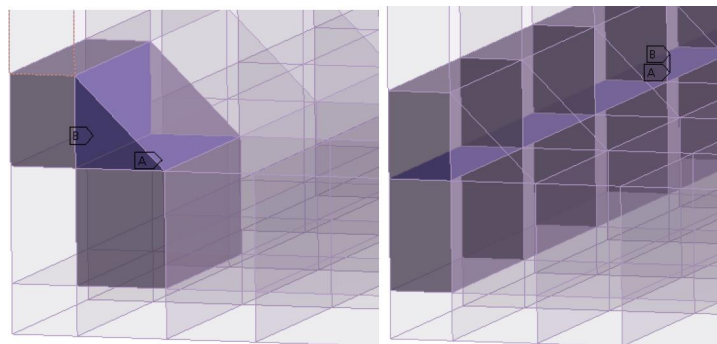
Kuva 29. Kontakteilla mallinnetun (vasen) ja yhtenäisenä rakenteena mallinnetun (oikea) toisesta päästä silloitushitsatun palkin eroavaisuudet. Syntyvä pituusero vaikuttaa huomattavasti kaareutumaa.

Kun on päätetty tilanteeseen sopiva mallinnustekniikka yhteen verkottamisen osalta, tulee seuraavaksi päättää miten malli kannattaa verkottaa. Verkotuksen koko tulee valita juuri riittävän tiheäksi, jotta laskenta saavuttaa ratkaisun ja samalla laskenta-aika pysyy kohtuullisena. Suositeltava määrä on vähintään 3 elementtiä ainevahvuuden yli hitsin läheisyydessä, jotta korkeat lämpötila- ja jännitysgradientit pystytään kuvantamaan tarpeeksi tarkasti [43]. Vääntöä mallintaessa verkon harventaminen kohti levyn reunoja ei ole suositeltavaa, koska elementtien sivumitta vaikuttaa mallinnetun rakenteen jäykkyyteen merkittävästi. Sen sijaan verkon harventaminen levyn ainevahvuuden yli reunoja kohti ei aiheuta suurta eroavaisuutta tuloksissa [17]. Mikäli ollaan suorittamassa väsymisanalyysia, tulisi verkon olla tiheämpi, koska jännitysgradienttien tarkka kuvantaminen on väsymismitoituksessa oleellisten jännityshuippujen määrittämiseksi tärkeää [5,8]. Käytettäväksi suositellaan heksaelementtejä, joiden muodon tärkein tekijä on elementtien sivumittojen suhde; on pyrittävä vähintään hitsin läheisyydessä siihen, että elementtien sivumitat ovat mahdollisimman lähellä toisiaan eli toisin sanoen elementit ovat mahdollisimman ”kuutiomaisia”. Pitkulaiset ja venyneet elementit vääristyvät helposti lämpöjännitysten seurauksena, mikä aiheuttaa epästabiilisuutta laskennassa. Lineaaristen elementtien käyttö vähentää laskenta-aikaa, mutta välisolumillisten elementtien käyttö on suositeltavaa, koska ne simuloivat lämpötilajakaumaa tarkemmin termisen analyysin aikana useamman integrointipisteen johdosta samalla elementtimäärällä. Niiden muotofunktio on sulavampi ja se sallii plastisen venymän tarkemman kuvantamisen [15]. Esimerkki tämän työn puitteissa käytetystä elementtiverkosta esitetään kuvassa 30.



Kuva 30. Esimerkki malleissa käytetystä elementtiverkosta.

Mikäli yhteen verkotettua mallinnustekniikkaa ei käytetä, tulee malliin määrittää kontaktielementit. Hitsit kannattaa kiinnittää hitsattaviin kappaleisiin käyttäen ANSYS Mechanical R19.0 -ohjelmistoa käytettäessä *bonded* -tyyppisellä kontaktilla, joka käsittelee kappaleita ikään kuin yhteen verkotettuna. Hitsin geometria tuodaan hitsausnopeuden mukana pala kerrallaan elementtejä synnyttämällä. Vaihtoehtoisesti kaikki elementit voi mallintaa myös alussa, mutta tällöin hitsigeometrialla, jota ei ole vielä mallissa hitsaamalla synnytetty, täytyy olla merkityksettömän pieni jäykkyys eikä lämmönjohtavuutta. Yhteen hitsattavien kappaleiden väliselle kosketuspinnalle voi mallintaa sopivan, todellista hitsaustilannetta kuvastavan kontaktin riippuen kappaleiden käyttäytymisestä. Kitkaton tai kitkallinen epälineaarinen kontakti sopii useimpiin käyttötarkoituksiin. Epälineaarisen kontaktin voi muuttaa bonded-tyyppiseksi (lineaariseksi) kontaktiksi ANSYS Mechanical R19.0 -ohjelmistossa erillisellä komennolla kontaktisolmun ylittäessä ennalta määrätyn lämpötilan. Tämä lämpötila voi olla esimerkiksi käytetyn materiaalin sulamispiste. Esimerkki käytetyistä kontakteista esitetään kuvassa 31.



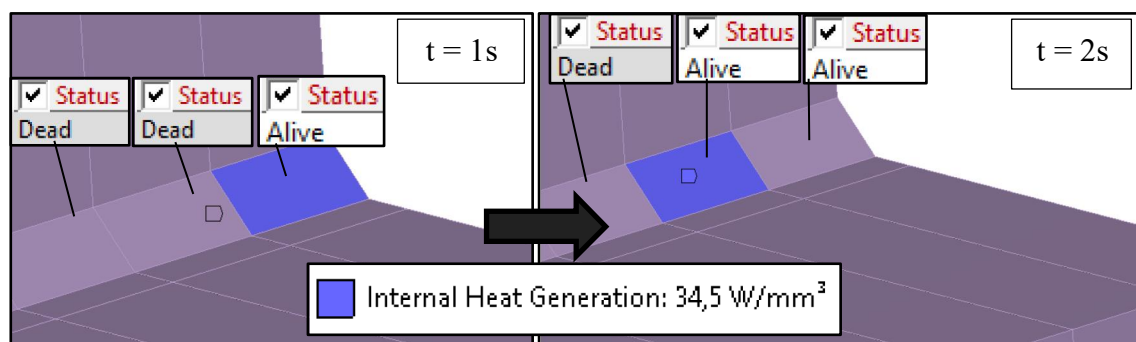
Kuva 31. Esimerkit mallissa käytetyistä kontakteista. Hitsitilavuudet on sidottu bonded-kontakteilla levyihin ja levyjen keskinäiselle kosketuspinnalle on mallinnettu leikkausvoiman vapauttava *No Separation* -kontakti. Tämän päälle on mallinnettu kitkaton kontakti, joka muutetaan sulamispisteen ylittyttyä bonded-kontaktiksi.

Termisessä analyysissä hitsiin tuotu lämpö tuodaan hitsin tilavuuteen sisäisenä lämmöntuotona. Hitsin tilavuus voidaan laskea hitsauslangan paksuuden, langansyöttönopeuden ja hitsausnopeuden avulla. Lämmöntuonti pituusyksikköä kohden saadaan kaavalla

$$Q = \frac{\eta UI}{v}, \quad (5)$$

jossa Q on lämmöntuonti mittayksikköä kohden, I on sähkövirta, U on jännite, v on hitsausnopeus ja η on hitsauksen termien hyötysuhde.

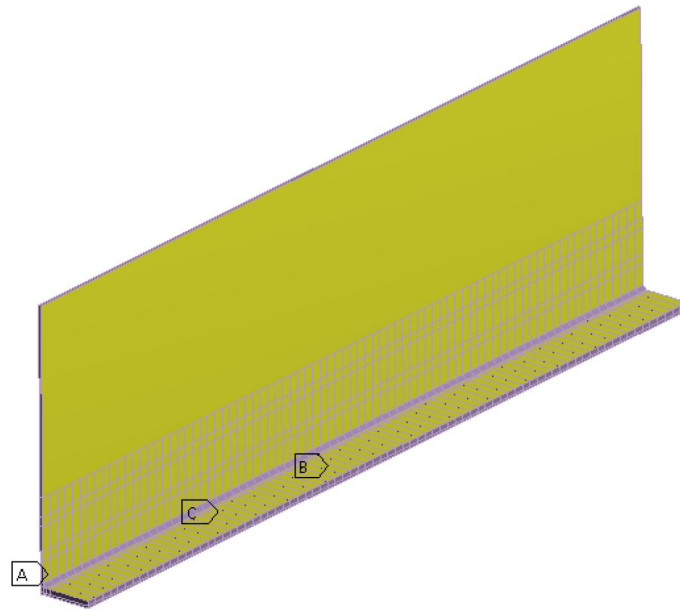
Hitsattava kappale jaetaan hitsausnopeuden ja kappaleen pituuden mukaan sopivan lyhyisiin osiin ja yhtä osaa lämmitetään yhdellä aika-askeleella. Seuraavalla aika-askeleella lämmitys siirretään seuraavaan hitsaustilavuuteen. Prosessia toistetaan siihen asti, kunnes hitsausprosessi on saatu simuloitua koko hitsin pituudelta. Sen jälkeen kappaleen annetaan jäähtyä riittävän kauan lämmöntuonnin suuruudesta, ympäristöstä ja termisistä materiaaliominaisuuksista riippuen. Analyysissä käytettävän aika-askelluksen tulee olla kohtuullisen tiheä hitsauksen aikana ja välittömästi sen jälkeen, jotta lämpötilagradientti ei nouse äkkinäisesti liian suureksi aiheuttaen konvergointiongelmia laskentamallissa. Esimerkki mallin osiin jakamisesta ja aika-askelluksesta esitetään kuvassa 32. Toinen tapa mallintaa tilanne olisi unohtaa lämmöntuonnin siirtäminen ajan suhteen ja tuoda koko hitsin geometria kerralla malliin. Tällöin lämpö tuotaisiin kerralla koko hitsin matkalle ja sen vaikutusaika laskentamallissa riippuu hitsausnopeudesta. Tämän johdosta menetelmä on laskenta-ajallisesti huomattavasti vähemmän vaativa, koska aika-askelia on useiden kymmenien sijaan vain muutama. Tässä työssä on päädytty kuitenkin käyttämään ensiksi mainittua menetelmää, koska geometrian tuominen kerralla ei mahdollista suhteellisen lämpölaajenemisen vaikutuksen huomioon ottamista. Luvussa 5.3 perehdytään syvemmin näiden kahden mallinnustavan eroihin laskentatuloksissa.



Kuva 32. Lämmöntuonnin ja geometrian aktivointi paloittain hitsausnopeuden suhteen

Hitsin ja mahdollisen esilämmityksen lämmöntuontien lisäksi termiseen analyysiin on mallinnettava kappaleen ja ympäröivän ilman välinen lämmönsiirto, jotta kappale jäähtyy hitsaamisen aikana ja sen jälkeen. Kirjallisuudessa esitetyt arvot lämmönsiirtokertoimelle teräksestä paikallaan olevaan ilmaan ovat noin 3–25 W/m²K [42]. Tämän työn malleissa on käytetty arvoa 10 W/m²K, jota on käytetty myös aiheesta tehdyissä tutkimuksissa [31,

44]. Lämmönsiirto voidaan mallintaa konvektiona ilman kanssa kosketuksissa oleville hitsattavien kappaleiden pinnoille. Konvektion lisäksi lämpöä siirtyy myös ympäristöön lämpösäteilemällä, jonka vaikutus otetaan huomioon kasvattamalla konvektion lämmönsiirtokerrointa. Tarkin tulos saataisiin kokeellisten lämpötilamittausten avulla jäähtymisen aikana ja käyttämällä kahdelle ilman ja teräksen väliselle lämmönsiirtoilmiölle (konvektio, säteily) omia kenttäyhtälöitä. Malleissa käytetty konvektioreunaehto esitetty kuvassa 33.



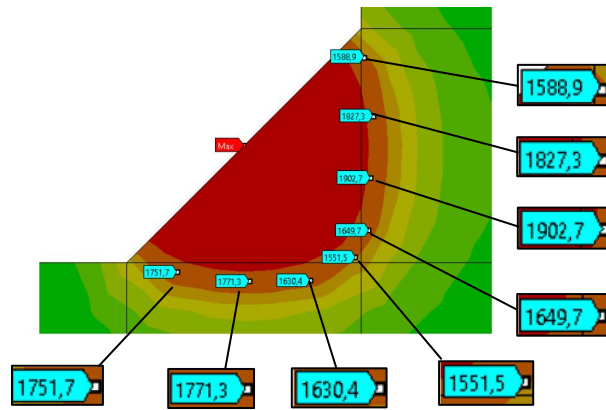
Kuva 33. Konvektioreunaehto kappaleen ulkopinnoilla keltaisella alueella.

Ohjelmisto soveltaa Newtonin jäähtymislakia konvektion lämmönsiirron mallintamisessa. Sen mukaan

$$\frac{q}{A} = h(T - T_{\infty}) \quad (6)$$

jossa q/A on pinnan läpi menevä lämpövuoto, h on konvektion lämmönsiirtokerroin, T on lämpötila ja T_{∞} on ympäristön lämpötila. [38]

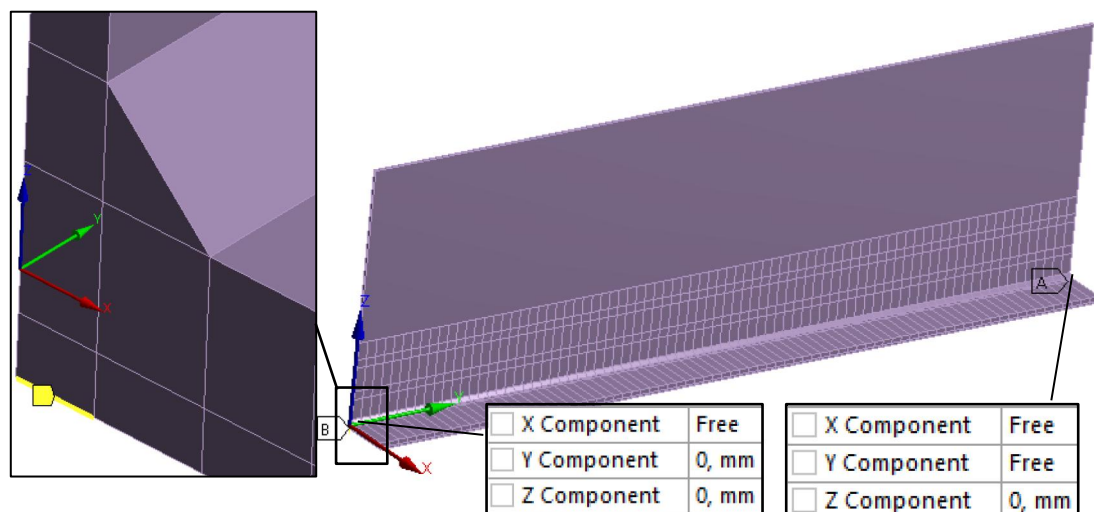
Termisen mallin paikkansapitävyyttä voidaan arvioida lasketun lämpötilajakauman avulla poikkileikkaukseen. Materiaalin sulamispisteen (teräksellä noin 1500°C) tulee ylittyä hitsin lisäksi perusaineessa molemmilla yhteen hitsattavilla levyillä, kuten kuvassa 34 esitetään. Lämpötilajakauman muodon tulee olla uskottava, koska lämpötilajakaumalla on merkittävä vaikutus syntyviin muodonmuutoksiin [45].



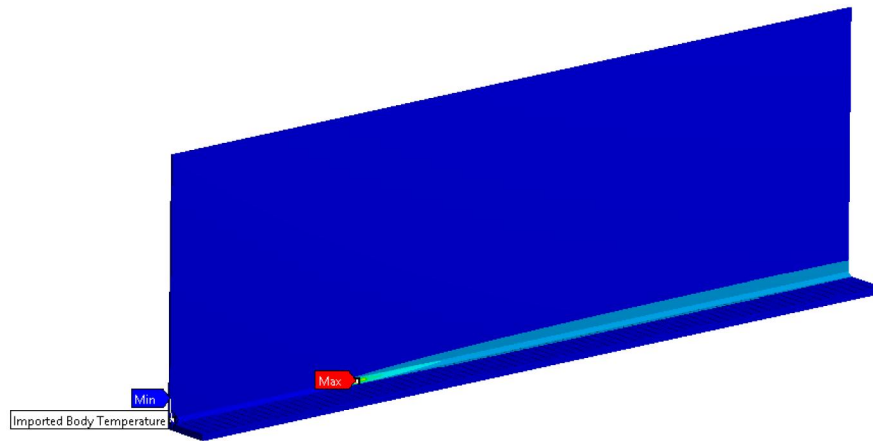
Kuva 34. Lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] poikkileikkauksessa hitsaushetkellä

Mekaanisessa analyysissä hitsattava kappale tuetaan mahdollisimman realistisesti todellista hitsaustilannetta jäljitellen. Tässä työssä tehdyissä malleissa palkit on tuettu yksinkertaisesti päistään laipan alareunasta, kuten kuvassa 35 esitetään. Analyysiin tuodaan lähtötietona lämpöjakauma edellä suoritetusta termisestä analyysistä, kuten kuvasta 36 nähdään. Ohjelmisto muuttaa lämpötilajakauman mekaanisessa analyysissä lämpöjännityksiksi ja -venymiksi.

Mekaanisen analyysin aika-askeleet kannattaa kopioida termisestä analyysistä sekaanusten välttämiseksi. Aika-askelten sisäisiä ratkaisuaskelia kannattaa kuitenkin tihentää, sillä jos lämpötilaa päivitetään liian harvoin, se johtaa helposti konvergointiongelmiin laskentamallissa. Tällöin lämpötilaero pääsee kasvamaan suureksi peräkkäisten aika-askelien välillä ja elementeille syntyvistä venymistä aiheutuvat vääristymät saattavat ylittää laskentaohjelmiston asetuksissa määritetyt toleranssirajat, jolloin laskenta keskeytyy, koska elementit eivät pysty enää luotettavasti kuvaamaan tapahtumia korkean vääristymisensä vuoksi. Mikäli lommahtaminen ei ole tilanteessa kriittistä, voidaan analyysissä käyttää pienten siirtymien teoriaa.



Kuva 35. Mekaniikkamallin tuennat. Tuennat sijaitsevat laippalevyn alareunalla uumalevyn kohdalla.



Kuva 36. Lämpötiladata tuodaan mekaniikkamalliin aika-askelittain

4.2 Jäännösvenymämenetelmä

Jäännösvenymämenetelmä (Inherent Strain Method) on yksinkertaistettu, elastista FE-analyysia hyödyntävä menetelmä hitsausmuodonmuutosten ja jäännösjännitysten arviointiin. Perusideana menetelmässä on, että kaikkien muodonmuutosten oletetaan syntyvän hitsin suuntaisista sekä sitä vastaan kohtisuorista venymäkomponenteista. Kokonaisvenymän muodostavat

- Elastinen venymä
- Plastinen venymä
- Lämpövenymä
- Faasisvenymä
- Virumavenymä

jolloin kaavamuodossa jäännösvenymälle saadaan lauseke

$$\varepsilon^* = \varepsilon^{elastic} + \varepsilon^{plastic} + \varepsilon^{thermal} + \varepsilon^{phase} + \varepsilon^{creep}, \quad (7)$$

jossa ε^* on jäännösvenymä, $\varepsilon^{elastic}$ on elastinen venymä, $\varepsilon^{plastic}$ on plastinen venymä, $\varepsilon^{thermal}$ on lämpövenymä, ε^{phase} on faasisvenymä ja ε^{creep} on virumavenymä.

Elastinen venymä palautuu nollaan kappaleen jäähtyttyä, jolloin jäljelle jäävä venymä on summa plastisesta venymästä, lämpövenymästä, faasisvenymästä ja virumavenymästä. Myös lämpövenymä on nolla kappaleen jäähtyttyä, koska kappale palautuu alkuperäiseen lämpötilaansa ja esteetön lämpölaajeneminen ei aiheuta jännityksiä. Virumavenymä on merkityksetön, sillä hitsausprosessissa lämpötila on korkea vain hetkellisesti. Korkean hiilipitoisuuden teräksissä merkittävän tilavuudenmuutoksen ja matalan muodonmuutoslämpötila-alueen johdosta faasisvenymä tulee ottaa huomioon. Matalahiilisisä teräksissä faasisvenymä on merkityksettömän pieni johtuen korkeasta muodonmuutoslämpötilasta ja vähäisestä tilavuuden muutoksesta, jonka aiheuttaa martensiittinen muodonmuutos [12,

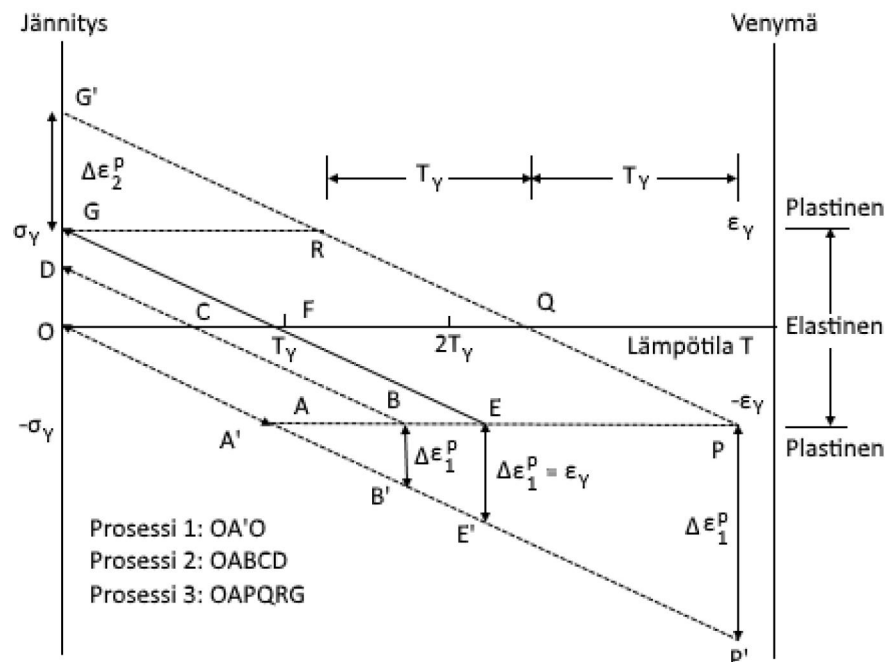
37, 46]. Edellä mainittujen oletusten puitteissa todetaan, että pelkällä plastisella venymällä voidaan kuvata jäännösvenymää riittävän tarkasti, jolloin kaavamuodossa ilmaistuna

$$\varepsilon^* = \varepsilon^{plastic} \quad (8)$$

Kuvan 37 avulla voidaan havainnollistaa jäännösvenymän syntymistä. Kuvaajassa esitetään jännitys ja venymä pystyakselilla ja lämpötila vaakakselilla. Jäännösvenymän kannalta merkittäviä lämpötiloja ovat myötölämpötila T_Y sekä tämän monikerta $2T_Y$. [12] Myötölämpötila määritellään kaavalla

$$T_Y = \frac{\sigma_y}{E\alpha}, \quad (9)$$

jossa σ_y on myötölujuus, E on kimmokerroin ja α lämpölaajenemiskerroin.



Kuva 37. Jäännösvenymän muodostuminen [12, 47]

Kuvassa 37 prosessi 1 kuvaa matalan lämpötilan lämmitystä, jossa jäännösjännityksiä tai plastista venymää ei synny. Prosessissa 2 lämpötila nousee yli myötölämpötilan, mutta jää alle $2T_Y$:n. Lämmitettäessä lämpövenymän lisäksi syntyy plastinen venymä $\Delta\varepsilon_1^P$, kun myötölujuus ylitetään. Jäähdytymisen jälkeen kappaleeseen jää edellä mainittu plastinen venymä lämpövenymien poistuttua. Tämä plastinen venymä aiheuttaa jäännösjännitykset, jotka voidaan laskea Hooken lain mukaisesti yksiakseliselle tapaukselle kaavalla

$$\sigma_1 = E\Delta\varepsilon_1^P, \quad (10)$$

jossa σ_1 on lämmityksestä aiheutuva jännitys ja $\Delta\varepsilon_1^p$ on lämmitettäessä syntyvä plastinen venymä.

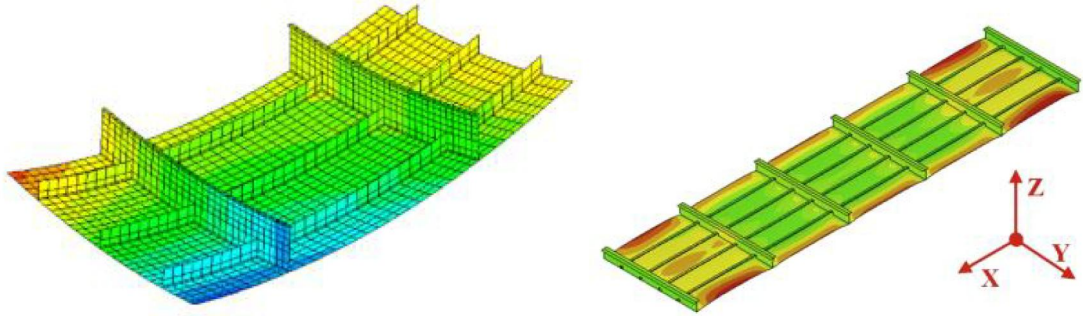
Prosessissa 3 lämpötilaa nostetaan yli $2T_V$:n, jolloin plastista venymää syntyy lämmitettäessä, kuten prosessissa 2, mutta myös kappaleen jäähtyessä. Huippulämpötilan vallitessa ollaan saavutettu myötölujuus ja kokonaisvenymä, joka on edelleen lämpövenymän ja syntyneen plastisen venymän $\Delta\varepsilon_1^p$ summa. Jäähtyessä myötölujuus saavutetaan jo pisteessä R, jolloin lämpötila on vieläkin yli myötölämpötilan. Tämän jälkeen jännitys pysyy tässä arvossa, mutta vastakkaissuuntaista plastista venymää syntyy $\Delta\varepsilon_2^p$ verran. Lopullinen plastinen venymä on näiden kahden plastisen venymäkomponentin summa

$$\varepsilon^{plastic} = \Delta\varepsilon_1^p + \Delta\varepsilon_2^p \quad (11)$$

jossa $\varepsilon^{plastic}$ on plastinen venymä, $\Delta\varepsilon_1^p$ lämmityksessä aiheutuva plastinen venymä ja $\Delta\varepsilon_2^p$ jäähtyessä aiheutuva plastinen venymä. Lämmitettäessä syntyvä venymä on puristava ja jäähtyessä syntyvä venymä vetävä. [12, 47]

Plastisen venymän levinneisyysalue ja suuruus eri suuntiin voidaan määrittää edellä käytetyllä TEPA:lla, jolloin siitä saatuja plastisen venymän tuloksia voidaan käyttää alkuehtona elastisessa FEM-analyysissa syöttämällä malliin venymäalueet ja -komponentit. Jäännösvenymämenetelmä mahdollistaa elastisen FEM-analyysin hyödyntämisen, koska venymät määrittävät jäännösjännitykset ja deformaatiot. Plastisen venymän aluetta ja suuruutta voidaan myös arvioida analyttisesti hitsaus- ja materiaaliparametrien avulla [12, 36, 47, 48, 49], mutta tällöin saatu tulos on epätarkempi laskennassa tehtyjen yksinkertaistuksien vuoksi. Etuna jäännösvenymäanalyysilla on sen ratkaisunopeus, joka on elastisen mallin ja yhden aika-askeleen ansiosta tuntien tai päivien sijaan sekunteja tai minutteja. Analyysilla päästään teollisuuden tarpeet tyydyttävään tarkkuuteen, mikäli laskentaparametrit on määritelty tarpeeksi hyvin. [12, 36] Barsoumin tekemässä tutkimuksessa erilaisista hitsausmuodonmuutosten mallinnustekniikoista on jäännösvenymämenetelmällä saaduille muodonmuutoksille todettu jopa 90% vastaavuus TEPA mallin tuloksiin verrattessa [36].

Menetelmä soveltuu erityisesti monimutkaisempien rakenteiden muodonmuutosten analysointiin, joissa on useita samanlaisia hitsausliitoksia. Laskennallisesti vaativa TEPA voidaan tehdä kerran jokaiselle liitostyypille ja venymätuloksista voidaan luoda kirjasto, jota käytetään suurempien, vastaavista liitoksista muodostuvien rakenteiden hitsausmuodonmuutosten arviointiin. T-liitoksen tapauksessa tällaisia voisivat olla esimerkiksi jäykistetyt levykenttärakenteet. Menetelmä ei rajoitu pelkästään T-liitoksien muodonmuutosten simulointiin, vaan sitä voidaan hyödyntää myös muiden liitostyyppien kanssa. Jäännösvenymämenetelmän tai jonkin sen johdannaismenetelmän hyödyntämisestä levykenttärakenteisiin tehdyissä tutkimuksissa [21, 37] mallien antamien muodonmuutosten vastaavuus mittaustuloksiin on todettu hyväksi. Esimerkitapauksia esitetään kuvassa 38.



Kuva 38. Esimerkkejä rakenteista, joiden hitsausmuodonmuutosten määrittämiseen jäännösvenymämenetelmä soveltuu hyvin [21, 37]

Jäännösvenymämenetelmä ei sovellu sellaisten hitsausten mallinnukseen, jossa kappaleet pääsevät hitsauksen aikana huomattavasti liikkumaan toistensa suhteen. Toisin sanoen esimerkiksi vain toisesta päästään silloitushitsatun ja esilämmitetyn T-palkin muodonmuutoksia hitsaamisen aikana ja sen jälkeen ei pystytä simuloimaan luotettavasti tällä menetelmällä, koska kappaleet pääsevät lämpölaajenemaan toistensa suhteen esilämmityksen aikana. Menetelmän perustana on lämmöntuonnin perusteella laskettujen plastisten venymien syöttäminen lasketulle venymäalueelle, jolloin ennen hitsausta tapahtuvat pituuden muutokset ja plastista venymää aiheuttamattomat muodonmuutokset kappaleiden välillä jätetään ottamatta huomioon, mikä aiheuttaa huomattavaa epätarkkuutta laskennan tuloksissa. Tämä on osasy, miksi tätä menetelmää ei ole sovellettu tämän työn puitteissa. Pääsääntö on se, että jäännösvenymämenetelmää on yksinkertaisesti järjetöntä käyttää yksittäisten T-palkkien analysointiin, koska juuri sama rakenne joudutaan joka tapauksessa analysoimaan TEPA:lla, jotta venymät ja venymäalueet saadaan selvitettyä.

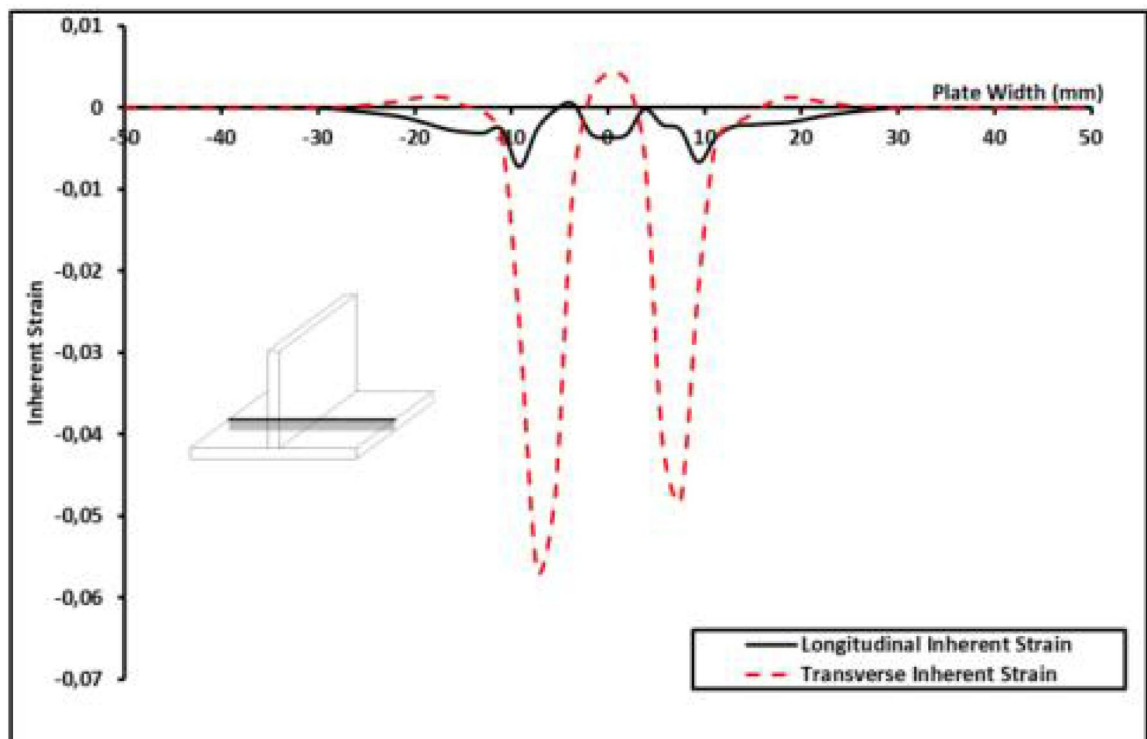
4.2.1 Materiaaliominaisuudet ja materiaalmalli

Jäännösvenymäanalyysissä muodonmuutosten oletetaan syntyvän kappaleeseen jäävästä plastisesta venymästä sen jäähtyttyä, jolloin materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuutta ei tarvitse ottaa huomioon eikä termisiä materiaaliominaisuuksia tarvitse määrittää. Mekaanisista materiaaliominaisuuksista oleellisia ovat kimmokerroin sekä Poissonin luku huoneenlämmössä. Näiden suuruus on esitetty kuvassa 27, jolloin referenssilämpötilana käytetään huoneen lämpötilaa. Analyysin ollessa puhtaasti elastinen myötölujuutta ei tarvitse ottaa huomioon. On kuitenkin hyvä huomata, että venymätulokset tuodaan Thermal-Elastic-Plastic mallin tuloksista, jossa materiaaliominaisuuksia on mukana useampia ja ne ovat lämpötilasta riippuvia. Materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuudella on siis suuri merkitys kappaleeseen syntyvien venymien kannalta, mutta venymien ollessa jo tiedossa ei materiaalmallin tarvitse olla enää epälineaarinen, mikä säästää laskenta-aikaa huomattavasti.

4.2.2 Mallinnustekniikka

Rakenne voidaan mallintaa yhteen verkotettuna, koska muodonmuutosten oletetaan syntyvät ainoastaan lopulliseen jäähtyneeseen rakenteeseen jäävistä plastisista venymistä. Tuennat mallinnetaan todellisuutta vastaavaksi, monesti yksinkertaisesti tuetuksi, koska kappale on usein vapaa hitsausprosessin päätyttyä. Elastinen materiaalmalli ei ota huomioon nurjahdus- tai lommahdusilmiöitä, joten suunnittelijan oltava tietoinen rakenteen mahdollisista ongelmista stabiilisuuden suhteen ja tarkistettava epävarmoissa tapauksissa se geometrialtaan ja materiaaliltaan epälineaarisen laskentamallin avulla. Menetelmä ei sovellu käytettäväksi tapauksiin, joissa muut ilmiöt kuin hitsaamisen aiheuttama plastinen venymä ovat merkittäviä muodonmuutosten aiheuttajia. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi sellaiset liitokset, joissa kappaleet liikkuvat merkittävästi toistensa suhteen johtuen niihin kohdistuvista kiinnityksistä tai esilämmitys tai -jännitysvoimista.

TEPA -laskentamallista saatu venymien suuruus luetaan hitsin pituus- ja poikittaissuunnassa sekä uumalevyille että laippalevyille. Venymien ja venymäalueen suuruus muuttuu palkin pituussuuntaisen sijainnin mukana liikkuvan lämmönlähteen luonteesta ja päätyvaikutuksista johtuen. Hyvä arvio saadaan, kun venymistä kumpaankin suuntaan määritetään keskiarvo, joka sijoitetaan sen jälkeen mallista luetulle venymäalueelle. Päätyvaikutuksia ei oteta huomioon, eli palkin päädyissä olevat plastiset venymät jäävät analyysin ulkopuolelle. [36]



Kuva 39. TEPA:sta saadut pituus- ja poikittaissuuntaiset venymät [36]

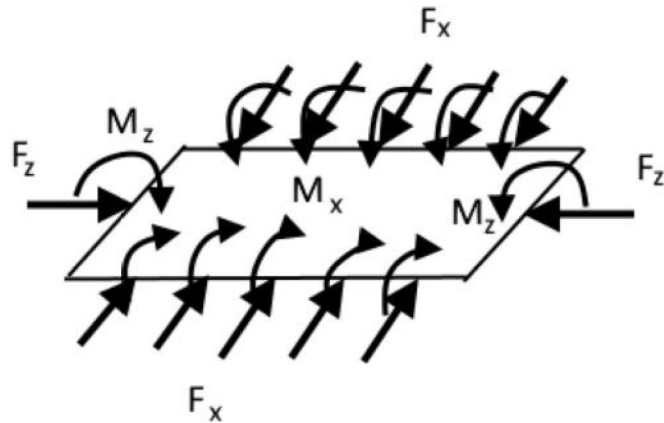
Kuvan 39 mukaisessa esimerkissä venymät sijoitettaisiin laippalevyyn noin 40 mm levyiselle alueelle. Venymien suuruus lasketaan keskiarvona valitulle alueelle; poikittaissuuntaisen venymän arvo olisi tällöin noin $-0,025$ ja pituussuuntaisen venymän $n. -0,004$. Samat parametrit luettaisiin tämän jälkeen uumalevyltä, jonka jälkeen ne syötettäisiin elastiseen FE-malliin, jonka ratkaisuna saadaan rakenteeseen muodostuvat hitsausmuodonmuutokset. Muun suuntaisia venymiä ei oteta huomioon, koska muodonmuutosten oletettiin johtuvan nimenomaan hitsin pituus- ja poikittaissuuntaisista venymistä.

4.3 Muita menetelmiä

Edellä mainittujen menetelmien lisäksi on kehitetty useita muita yksinkertaistettuja laskentamenetelmiä hitsausmuodonmuutosten määrittämiseksi, jotka voivat osoittautua hyödyllisiksi erikoistilanteissa tai tiettyjä ohjelmistoja käytettäessä. Tässä luvussa esiteltäviä simulointimenetelmiä ei ole hyödynnetty tämän työn puitteissa, mutta niiden laskentaperiaatteet ja tarkkuus muihin menetelmiin verrattuna esitellään aiheesta tehtyihin tutkimuksiin pohjautuen. Yksinkertaistetut hitsausmuodonmuutosten simulointimenetelmät perustuvat pääasiassa jäännösvenymämenetelmään, mutta eroavat jäännösvenymän syöttötavassa. Näitä ovat esimerkiksi *jäännössiirtymä-* ja *kutistumavoimamenetelmät*. [4, 21, 50] Toiset menetelmät käsittelevät jäännösvenymän aiheuttajana plastisen venymän sijaan laskennallisesti määritettävää ekvivalenttia lämpövenymää, kuten *SDB*-menetelmä [51]. Jäännösvenymämenetelmän tavoin nämäkin menetelmät soveltuvat vain itse hitsausprosessin aiheuttamien muodonmuutosten määrittämiseen.

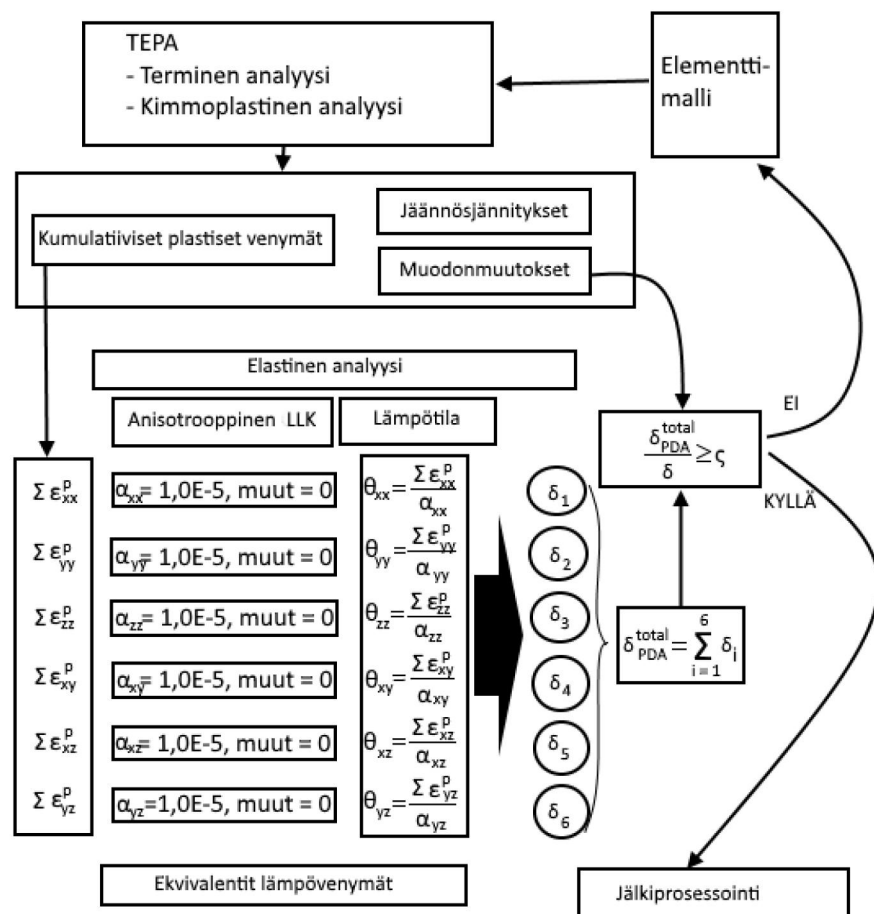
Jäännössiirtymämenetelmässä (engl. inherent deformation) jäännösvenymä integroidaan hitsattavan profiilin poikkileikkauksen yli, kohtisuoraan suuntaan hitsaussuuntaa vastaan. Jäännössiirtymä jaetaan neljään komponenttiin: pituussuuntaiseen kutistumaan, poikittaissuuntaiseen kutistumaan, pituussuuntaiseen kiertymään ja poikittaissuuntaiseen kiertymään. Jäännössiirtymistä lasketaan tämän jälkeen keskiarvo hitsaamispiteuden suhteen, jonka jälkeen lasketut arvot sijoitetaan elastiseen FEM-malliin aiemmin TEPA:n avulla määritellylle venymäalueelle. Aiheesta voi lukea enemmän esimerkiksi tutkimuksesta [37], jossa on sovellettu jäännössiirtymä menetelmää T-liitoksen ja jäykistetyn paneelirakenteen hitsausmuodonmuutosten määrittämiseksi.

Kutistumavoimamenetelmässä (engl. shrinkage force) määritetään ekvivalentit voimat ja momentit integroimalla ne jäännösvenymistä. Komponentit jaetaan tällöin pituussuuntaiseen voimaan, poikittaissuuntaiseen voimaan, pituussuuntaiseen momenttiin ja poikittaissuuntaiseen momenttiin kuvan 40 mukaisesti. Pituussuuntainen voima ja momentti asetetaan vaikuttamaan aiemmin määritettyyn jäännösvenymätilavuuteen ja poikittaissuuntainen voima ja momentti asetetaan vaikuttamaan rakenteen päätysolmuihin. Menetelmää on sovellettu esimerkiksi tutkimuksessa [52] T-liitokseen ja tutkimuksessa [4] päittäisliitoksen muodonmuutosten määrittämisessä.



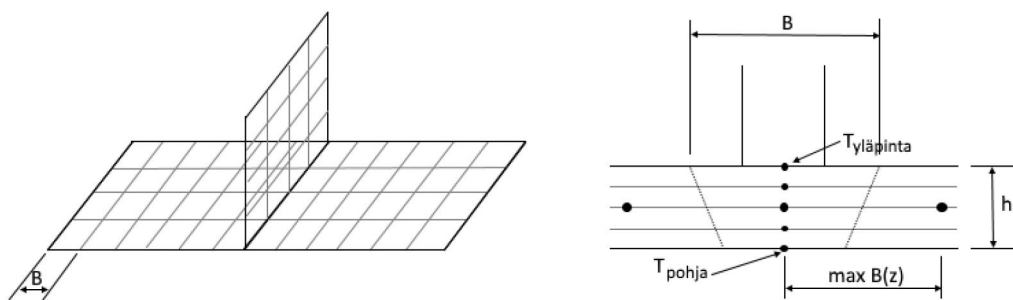
Kuva 40. Kutistumavoimamenetelmässä käytettävät ekvivalentit voimat ja momentit [36]

PDA (engl. Plasticity Based Distortion Analysis) perustuu suoraan jäännösvenymämenetelmään. Menetelmien suurin eroavaisuus on se, että PDA:ssa lasketaan kaikki 6 venymäkomponenttia, eli kolmen translaatiokomponentin lisäksi kolme leikkauskomponenttia. Leikkauskomponentilla xy on havaittu olevan määräävä rooli kulmavetäymän määrittämisessä [2, 15]. Menetelmässä käytettävä laskentaproseduuri esitetään kuvassa 41. Menetelmää on sovellettu ohutlevyisten T-liitosten muodonmuutosten määrittämisessä [15, 53].



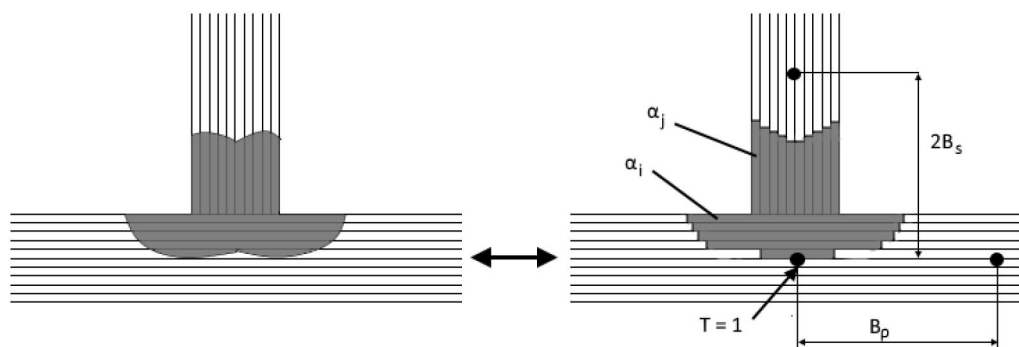
Kuva 41. PDA:n prosessikaavio [15]

Han [51] kehittämässä **SDB** (engl. Strain as Direct Boundary) menetelmässä mallinnetaan jäännösvenymää plastisen venymän sijaan ekvivalenttina lämpövenymänä, joka syötetään samaan tapaan venymäalueen solmuille elementtiverkossa. Neljä parametria on määritettävä laskennallisesti perustuen jäännösvenymään ja sen alueeseen: lämpölaajenemiskerroin, laskennallinen lämpötila ylä- ja alapinnoilla sekä elementtikoko hitseissä. Laskennalliset lämpötilat asetetaan venymäalueen solmuille ja materiaaliominaisuudet mallinnetaan lämpötilasta riippumattomina. Lämpötila ylä- ja alapinnan välisellä alueella määritetään lineaarisella interpoloinnilla [51]. Menetelmää havainnollistetaan kuvassa 42. Laskentatavan huonona puolena on se, että huomioon otetaan vain poikittaissuuntaiset venymät, mikä tarkoittaa sitä, että menetelmä kelpaa ainoastaan kulmavetäymän määrittämiseen.



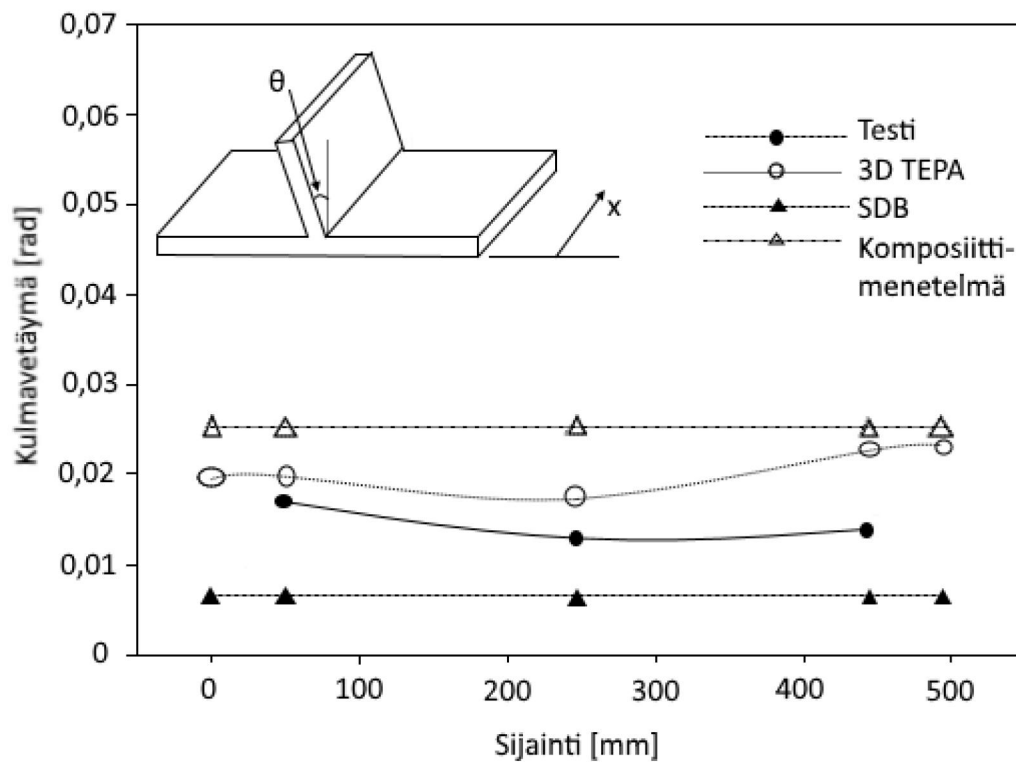
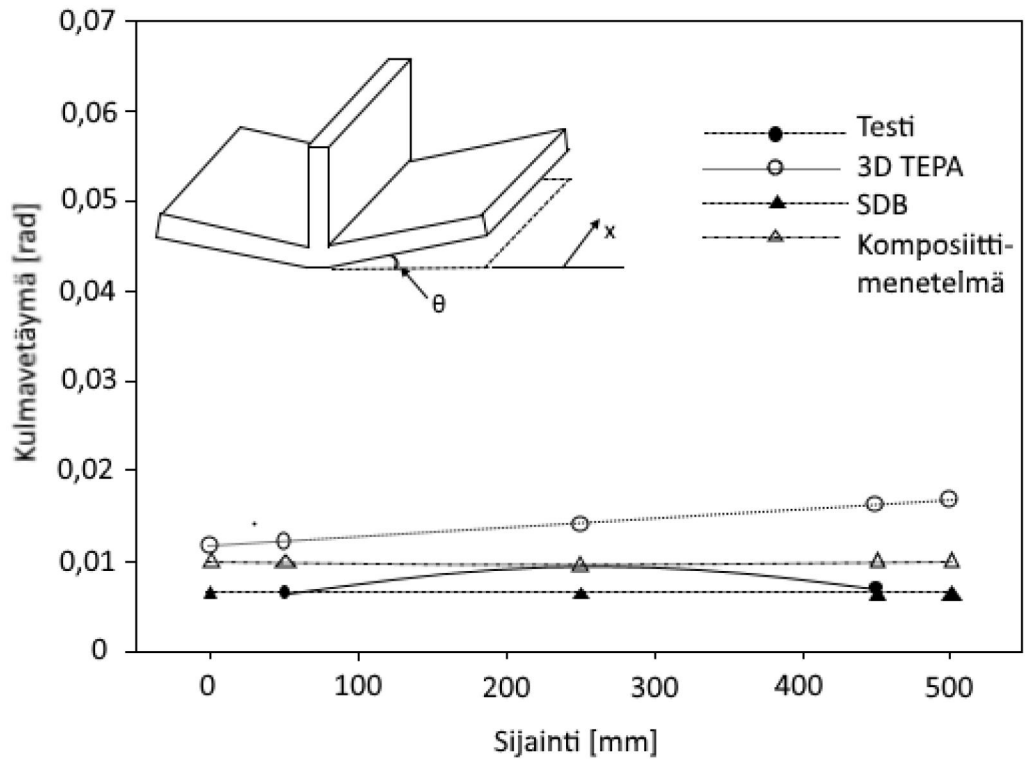
Kuva 42. SDB:n laskentaparametrit [51]

Kim, Kang ja Chung jatkokehittivät menetelmää sopivammaksi T-liitoksille siten, että huomioon otetaan pelkän laippalevyn lisäksi myös uumalevyn jäännösvenymäalue. Tällöin voidaan määrittää kulmavetäymä tarkemmin myös uumalevyille. Menetelmä eroaa SDB:stä myös siinä, että lämpölaajenemiskerrointa muokataan ainevahvuuden yli hyödyntämällä komposiittikuorielementtejä. [51] Menetelmän toimintaperiaatetta havainnollistetaan kuvassa 43.

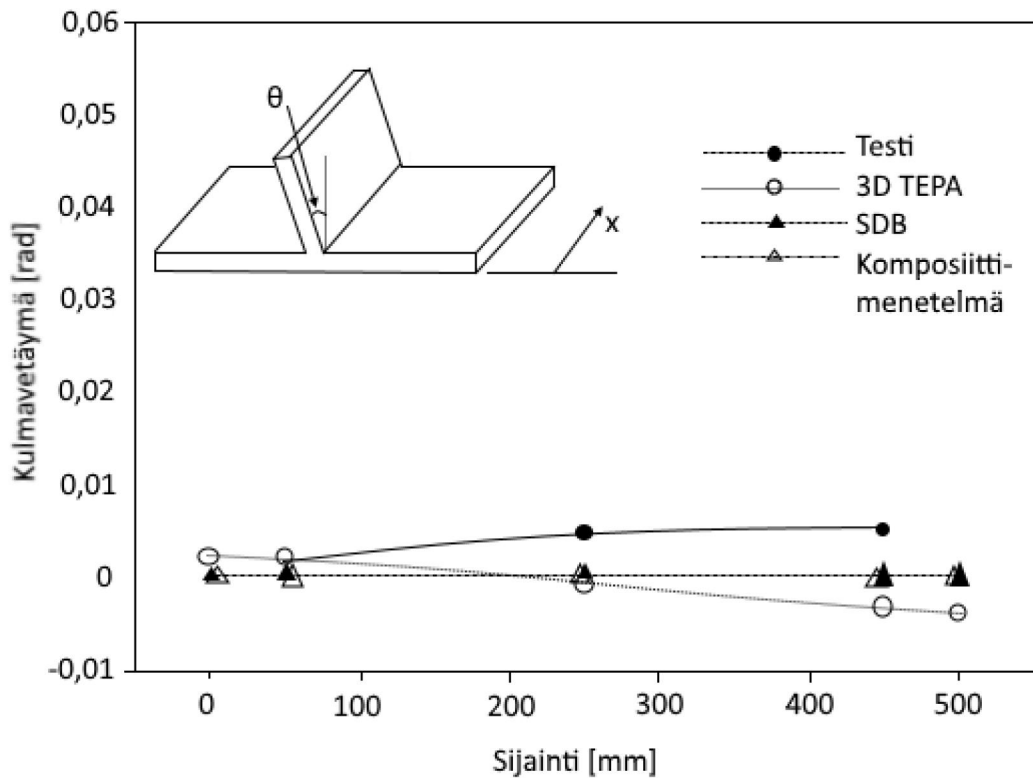
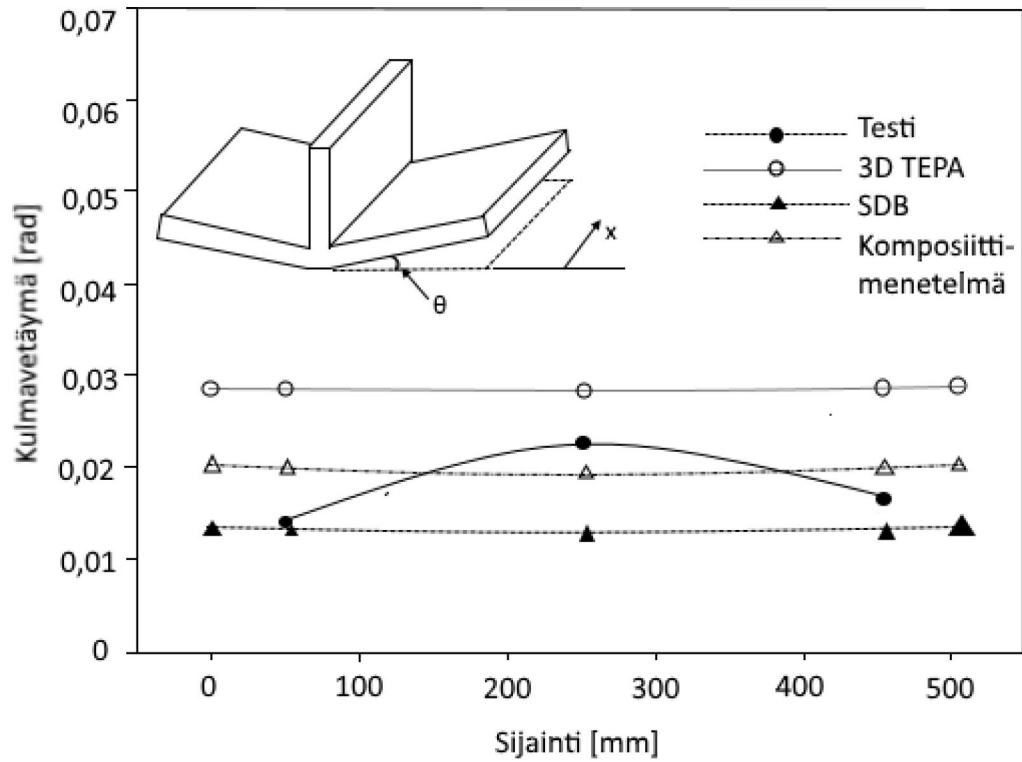


Kuva 43. Komposiittikuorielementtejä hyödyntävän menetelmän toimintaperiaate [51]

SDB:hen verrattuna menetelmällä saavutetaan hieman tarkemmat tulokset kulmavetäymän suhteen, kuten nähdään kuvista 44 ja 45. Mallinnustapa on kuitenkin kohtuullisen aikaa kuluttava ja se soveltuu ainoastaan kulmavetäymän määrittämiseen, joten sen hyödyntäminen on kannattavaa vain erikoistapauksissa.

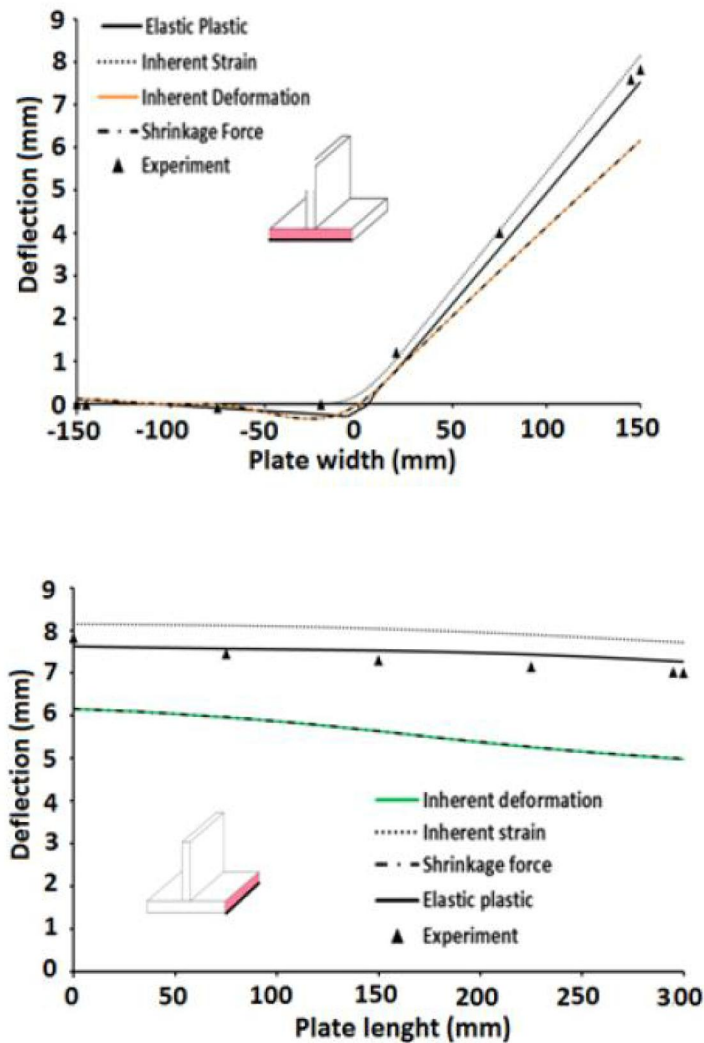


Kuva 44. SDB:n ja komposiittikuorielementtejä hyödyntävän menetelmän vertailu mitaustuloksiin nähden. Yksipuoleisen pienan aiheuttamaa kulmavetäymä. [51]



Kuva 45. SDB:n ja komposiittikuorielementtejä hyödyntävän menetelmän vertailu mitaustuloksiin nähden. Kaksipuoleisen pienan aiheuttamaa kulmavetäymä [51]

Z. Barsoum vertailee tutkimuksessaan [36] yleisimpien, useissa tutkimuksissa [4, 21, 37] sovellettujen mallinnustapojen tarkkuutta muodonmuutosten määrittämisessä. Tuloksista huomataan, että TEPA antaa parhaiten mittaustuloksia vastaavat laskentatulokset, mutta myös jäännösvenymämenetelmällä päästään erittäin hyvään tarkkuuteen. Jäännösvenymämenetelmästä johdettujen menetelmien on havaittu aliarvioivan muodonmuutoksia. Tämä johtuu siitä, että näissä analyyseissa suoritetaan yksi ylimääräinen integrointiaskel muunnettaessa venymiä siirtymäksi tai voimaksi, mikä vaikuttaa heikentävästi tulosten tarkkuuteen. Menetelmien keskinäinen vertailu ja vastaavuus mittaustuloksiin esitetään kuvassa 46. [36]



Kuva 46. Kulmavetäymä ja kaareutuma eri menetelmillä mallinnettuna [36]

Nykypäivän laskentaohjelmistoilla venymän syöttäminen suoraan mallin solmupisteisiin on vaivatonta, jolloin yksinkertaistetuista menetelmistä muodonmuutosten ennustamisessa on yleensä kannattavinta käyttää jäännösvenymämenetelmää. Tämän työn puitteissa on hyödynnetty muodonmuutoksia tarkimmin simuloivaa TEPA menetelmää, mutta isompia rakenteita analysoidessa jäännösvenymämenetelmä on kannattava vaihtoehto laskenta-ajan hallitsemiseksi.

5. LASKENTAMALLIN TULOKSET JA PARAMETRIEN VAIKUTUS MUODONMUUTOKSIIN

Tässä luvussa esitetään luodun TEPA-laskentamallin tulokset. Simulaatiomallin paikkansapitävyys verifioidaan kokeellisten mittaustuloksien perusteella. Lisäksi todetaan oleellisten muunneltavissa olevien parametrien vaikutus hitsausmuodonmuutoksiin luotujen laskentamallien sekä aiheesta tehtyjen tutkimusten pohjalta.

Ajasta riippuvan kimmoplastisen termomekaanisen FEM-analyysin (TEPA) avulla pystytään ennustamaan muodonmuutoksia ja jäännösjäännityksiä hyvällä tarkkuudella. Haasteena menetelmässä on riittävän tarkka parametrien ja materiaaliominaisuuksien määrittäminen. Menetelmän suurin heikkous on siihen kuluva laskenta-aika. Jäännösvenymämenetelmä on tarkkuudeltaan lähes yhtä hyvä, mutta se vaatii esitietonaan ratkaistun yksityiskohtaisen analyysin ja sillä ei täten saavuteta hyötyä yksinkertaisten liitosten kertaluonteisessa analysoinnissa, vaan sillä saavutettavat hyödyt nousevat esiin suurempien rakenteiden hitsausmuodonmuutoksia määritettäessä.

Seuraavilla hitsaukseen liittyvillä tekijöillä on oleellinen vaikutus hitsausmuodonmuutoksiin:

- 1) Hitsausnopeus
- 2) Hitsausteho
- 3) Materiaali
- 4) Geometria
- 5) Esilämmitys

Puhtaasti muodonmuutosten minimoinnin näkökulmasta ajateltuna hitsausprosessin parametreista hitsausnopeus tulisi maksimoida ja lämmöntuonti minimoida. Plastiset venymät kasvavat myötölujuuden kasvaessa, mutta samalla myös plastisen venymän alue pienenee, jolloin materiaalin lujuuden vaikutus muodonmuutoksiin on tapauskohtaista. Kimmokertoimen tulee olla mahdollisimman korkea, jotta rakenteen jäykkyys vastustaa muodonmuutoksien syntymistä tehokkaasti. Hitsattavan geometrian olisi hyvä olla mahdollisimman symmetrinen ja hitsin etäisyyden profiilin vetojäykkyyskeskiöön mahdollisimman pieni muodonmuutosten minimoimiseksi. Esilämmitys tulee toteuttaa niin, että se aiheuttaa hitsausmuodonmuutoksille vastakkaissuuntaisia muodonmuutoksia ja tällä tavalla kompensoi niitä.

5.1 Laskentamallin verifiointi

TEPA:n paikkansapitävyys verifioidaan tehtyjen hitsaustestien mittaustulosten perusteella. Taulukoissa 3–6 esitetään erilaisilla hitsausjärjestelyillä hitsattujen T-palkkien kaareutumien ja kulmavetäymien tulokset koepaloista mitattuna ja FEM-ohjelmistoa käyttäen TEPA -menetelmällä simuloituna. Tuloksia tulkittaessa on tärkeää tiedostaa, että mittaustuloksissa on useita epätarkkuuslähteitä sekä asioita, joita laskennassa ei voi ottaa huomioon. Laskentamallin ja todellisen hitsaustilanteen välisiä virhe- ja epätarkkuuslähteitä esitetään taulukossa 2.

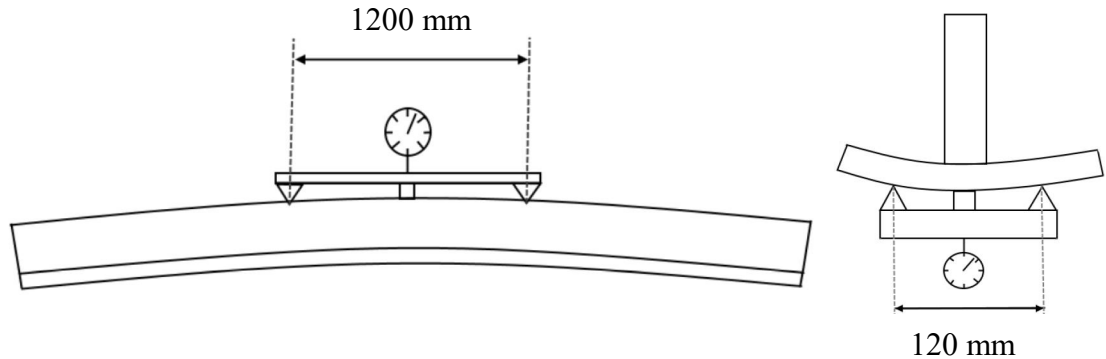
Taulukko 2. Laskentamallin virhelähteet

<i>Ideaalinen lähtötilanne</i>
<i>Materiaaliominaisuuksien vastaavuus ja vaihtelu tuote-erittäin</i>
<i>Kaikkia ilmiöitä ei oteta huomioon mallinnuksessa (mm. faasimuutokset)</i>
<i>Simuloitu palkki eri mittainen kuin testeissä hitsattu</i>
<i>Mittalaitteen epätarkkuus</i>
<i>Tilastollisen hajonnan puute mittaustuloksissa</i>

Laskentamallit lähtevät aina ideaalisesta lähtötilanteesta, jossa kappaleet ovat alkutilaansa täysin suorina, mittatarkkoja ja jännityksettömiä. Todellisuudessa toisiinsa hitsaamalla liitettäviin levyihin voi olla jäänyt jäännösjännityksiä tai alkumuodonmuutoksia aiemmista levyjen tuotannossa käytetyistä valmistusprosesseista, kuten esimerkiksi polttoleikkauksesta. Kappaleiden välinen alkurako ennen hitsausta vaikuttaa hitsausmuodonmuutoksiin, kuten luvussa 2.3 todetaan. Materiaali ei ole todellisuudessa täysin homogeenista, mikä vaikuttaa materiaalin mekaanisiin ja termisiin materiaaliominaisuuksiin. Lisäksi materiaalien materiaaliominaisuudet, kuten myötölujuus, vaihtelevat tuote-erien välillä. Laskentamalleissa ei myöskään oteta huomioon merkityksettömiksi todettuja ilmiöitä, kuten matalahiilisten terästen faasimuutoksia tai hitsin tarkkaa geometriaa. Faasimuutoksessa tapahtuva tilavuuden muutos otetaan huomioon simulaatiossa ainoastaan lämpölaajenemiskertoimen lämpötilariippuvuudessa. Lisäksi laskenta-ajan säästämiseksi simuloinnissa on mallinnettu vain 1,2 m pitkä palkki, jolloin päätyvaikutuksilla on mahdollisesti vaikutusta kaareutumatuloksiin. Hitsaustesteissä hitsattavat palkit olivat vähintään 3 metriä pitkiä. Kaikki edellä mainitut tekijät tulee tiedostaa, koska hitsaustestejä on suoritettu vain yksi kappale per testi, jolloin myöskään tulosten tilastollista hajontaa ei ole otettu huomioon mitenkään.

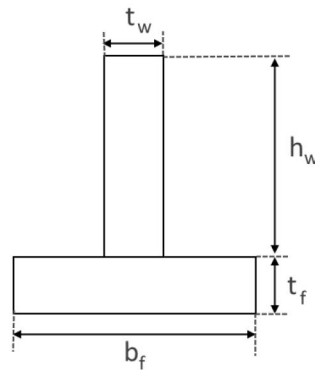
Mittaukset on suoritettu palkkien jäähdytyä huoneen lämpötilaan. Tämän jälkeen palkin kaareutuma mitattiin sekä uumalevyn päältä, että laipan alta 1,2 m pitkällä mittalaitteella. Mittalaitteen keskellä on mittakello, jonka epätarkkuudeksi arvioidaan $\pm 0,1$ mm. Kaareutumatuloksia mitataan eri pituussuuntaisista sijainneista, eli sekä läheltä palkin päätyä,

että sen keskeltä. Vastaavasti kulmavetäymää mitataan samankaltaisella mittausvälineellä. Tämän mittausvälineen pituus on 120 mm, joten kulmavetäymä mitataan siis 60 mm etäisyydellä palkin keskilinjasta. Mittalaitteen epätarkkuudeksi arvioidaan $\pm 0,1$ mm. Havainnekuva mittajärjestelyistä esitetään kuvassa 47.



Kuva 47. Kaareutumien ja kulmavetäymien mittaaminen mittakellolla

Taulukoissa 3–6 esitetyistä tuloksista nähdään, että TEPA:lla saadut tulokset palkin kaareutumalle sekä kulmavetäymälle vastaavat mittaustuloksia hyvällä tarkkuudella, kun otetaan huomioon testihitsauksissa epätarkkuutta aiheuttavat tekijät, joita ei pystytä ottamaan huomioon laskentamalleissa. Mikäli mittaus- tai simulointituloksissa on ilmoitettu yhden arvon sijaan arvoalue, vaihtelee luettu arvo tällä välillä riippuen mittauspisteestä palkin pituussuunnassa. Profiilien mitat on havainnollistettu kuvassa 48. Mittaustulosten yksikkö on mittavälineen mittojen perusteella valittu, jolloin kaareutuma ilmoitetaan millimetreissä 1,2 metriä kohden ja kulmavetäymä millimetreissä 60 millimetriä kohden palkin keskeltä kohti laipan ulkoreunaa.



Kuva 48. Taulukoissa käytetyt T-profiilin mittojen merkinnät

Taulukossa 3 esitetään simuloinnin kaareutumatulokset testeissä, joissa ei ole käytetty esilämmitystä. Taulukossa 4 puolestaan esitetään kaareutumatulokset esilämmitetyille T-palkeille. Tuloksista nähdään, että simulaatiomalli vastaa mittaustuloksia hyvällä tarkkuudella kaareutumien suhteen. Taulukossa 5 esitetään vastaavat tulokset mittaustuloksien ja laskentamallien mukaisille kulmavetäymille ilman esilämmitystä. Pelkällä hitsauksella laskentamallin tarkkuus on edelleen hyvä. Taulukossa 6 esitetään puolestaan tulokset esilämmityillä hitsaustesteillä.

Taulukko 3. Laskentamallien ja testien antama palkin kaareutuma

Profiili ($h_w \times t_w \times b_r \times t_f$)	Hitsausnopeus [cm/min]	Lämmöntuonti mittayksikköä kohden [J/mm]	Mitattu kaareutuma [mm / 1,2 m]	Simuloitu kaareutuma [mm / 1,2 m]	Ero kaareutumassa mallin ja mittausten välillä [mm / 1,2 m]
190x8x150x10	93	500	0,5	0,7	+0,2
380x8x150x10	93	500	0,2	0,3	+0,1
420x8x150x15*	93	520	0,1	0,3	+0,2

Taulukko 4. Laskentamallien ja testien antama palkin kaareutuma esilämmityksillä

Profiili ($h_w \times t_w \times b_r \times t_f$)	Hitsausnopeus [cm/min]	Lämmöntuonti mittayksikköä kohden [J/mm]	Esilämmitys uumassa [kW]	Esilämmitys laipassa [kW]	Mitattu kaareutuma [mm / 1,2 m]	Simuloitu kaareutuma [mm / 1,2 m]	Ero kaareutumassa mallin ja mittausten välillä [mm / 1,2 m]
190x8x150x10	93	520	0	30	2,4	1,7	-0,7
190x8x150x10	93	500	20	30	-1,8	-1,6	+0,2
250x8x120x10	75	450	20	15	-0,5	-0,8	-0,3
380x8x150x10	93	500	20	30	0,3	0,2	-0,1
380x8x150x10	93	520	0	20	1,2	0,75	-0,45
380x8x150x10	93	520	10	40	0,7	0,5	-0,2
420x8x150x15*	93	520	0	40	1,2	1,2	0

Taulukko 5. Laskentamallien ja testien antama kulmavetäymä

Profiili ($h_w \times t_w \times b_f \times t_f$)	Hitsausnopeus [cm/min]	Lämmöntuonti mittayksikköä kohden [J/mm]	Mitattu kulmavetäymä [mm / 60 mm]	Simuloitu kulmavetäymä [mm / 60 mm]	Ero kulmavetäymässä mallin ja mittausten välillä [mm / 60 mm]
190x8x150x10	93	500	0,6–0,8	0,5–0,8	-0,1..0
380x8x150x10	93	500	0,6–0,8	0,55–0,9	-0,05..+0,1
420x8x150x15*	93	520	0,4	0,2–0,35	-0,2..-0,05

Taulukko 6. Laskentamallien ja testien antama kulmavetäymä esilämmityksillä

Profiili ($h_w \times t_w \times b_f \times t_f$)	Hitsausnopeus [cm/min]	Lämmöntuonti mittayksikköä kohden [J/mm]	Esilämmitys uumassa [kW]	Esilämmitys laipassa [kW]	Mitattu kulmavetäymä [mm / 60 mm]	Simuloitu kulmavetäymä [mm / 60 mm]	Ero kulmavetäymässä mallin ja mittausten välillä [mm / 60 mm]
190x8x150x10	93	520	0	30	0,4–0,6	0,2–0,25	-0,2..-0,35
190x8x150x10	93	500	20	30	0,3–0,5	0,1–0,15	-0,1..-0,35
250x8x120x10	75	450	20	15	0,5	0,35–0,5	-0,15..0
380x8x150x10	93	500	20	30	0,2–0,4	0,1–0,2	-0,1..-0,2
380x8x150x10	93	520	0	20	0,3–0,6	0,3–0,5	-0,1..0
380x8x150x10	93	520	10	40	0,2–0,4	-0,1–0,1	-0,3
420x8x150x15*	93	520	0	40	0–0,1	-0,1–0	-0,1

*Palkki aukotettu

Laskentamalli aliarvioi muodonmuutoksia hieman liian paljon esilämmitettyä puolta kohti. Mittaustulosten paikkansapitävyydestä ei voida olla täysin vakuuttuneita kaikissa testeissä, sillä esimerkiksi Taulukon 6 riveillä 1 ja 5 suoritetuissa testeissä kaikki kulmavetäymän kannalta oleelliset parametrit pysyvät samana, paitsi toisessa on käytetty 50% suurempaa tehoa laipan lämmittämiseen. Silti kulmavetäymän mittaustulos on molemmissa laipoissa käytännössä katsoen sama; laskentamalli sen sijaan antaa tulosten välille selvän eron. Tämä voi johtua esimerkiksi mittaustulosten tilastollisesta hajonnasta, mittalaitteen epätarkkuudesta ja/tai mallinnusteknisistä yksinkertaistuksista esimerkiksi esilämmityksen lämmöntonuonnissa malleihin.

Laskentamallin keskimääräinen virhe mittaustulokseen nähden esitetään taulukossa 7. Taulukon tulokset on saatu laskemalla mittaustuloksen ja laskentatuloksen erotus kaikista lasketuista tapauksista (Taulukot 3–6) ja ottamalla näistä keskiarvo. Laskentamallin tuloksiin voidaan virhelähteet huomioon ottaen olla erittäin tyytyväisiä.

Taulukko 7. *Laskentamallin keskimääräinen virhe mittausten perusteella*

Virhe ilman esilämmitystä kaareutumassa	Virhe esilämmityksellä kaareutumassa	Virhe ilman esilämmitystä kulmavetäymässä	Virhe esilämmityksellä kulmavetäymässä
0,17 mm / 1,2 m	0,28 mm / 1,2 m	0,13 mm / 60 mm	0,14 mm / 60 mm

5.2 Muunneltavien parametrien vaikutus muodonmuutoksiin

Tässä luvussa perehdytään hitsaus-, geometria- ja materiaaliparametrien vaikutukseen hitsausprosessin aikana syntyvissä muodonmuutoksissa. Oleellisimpien parametrien vaikutus muodonmuutoksiin esitellään simulaatioiden, mittaustulosten sekä aiheesta tehtyjen tutkimuksiin pohjautuen. Luvun perusteella tulisi pystyä muodostamaan yleiskuva siitä, millä keinoin hitsausmuodonmuutoksia voidaan vähentää prosessin parametreihin vaikuttamalla.

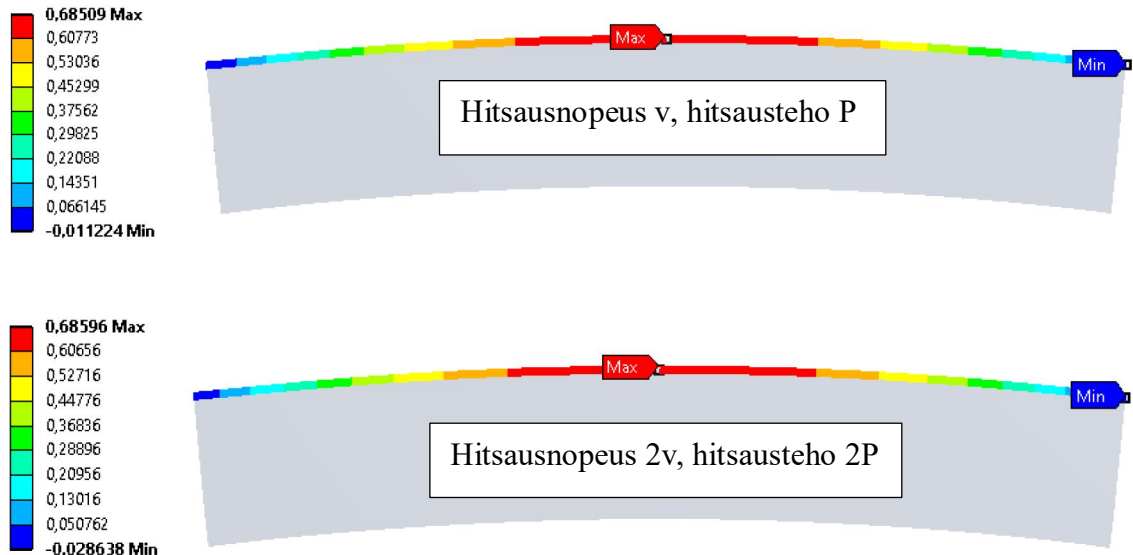
5.2.1 Lämmöntonuonti hitsin suuntaista mittayksikköä kohden

Lämmöntonuonti hitsin suuntaista mittayksikköä kohden kattaa termisen hyötysuhteen, hitsausnopeuden ja hitsaustehon yhteisvaikutuksen. Hitsausnopeuden kasvattaminen pienentää kaareutumaa ja yleensä myös kulmavetäymää. Poikkeuksena voidaan mainita ohuet laipat, joilla kulmavetäymä voi kasvaa, koska pienempi lämmöntonuonti johtaa siihen, ettei lämpö johdukaan enää laipan läpi. Tällöin lämpötilagradientti eli käytännössä lämpötilaero laipan pintojen välillä kasvaa ja tämän johdosta myös kulmavetäymä kasvaa [2]. Hitsausteho on muodonmuutosten näkökulmasta vaikutukseltaan saman tyyppinen kuin hitsausnopeus. Yleisesti hitsaustehoa eli lämmöntonuontia pienentämällä saavutetaan

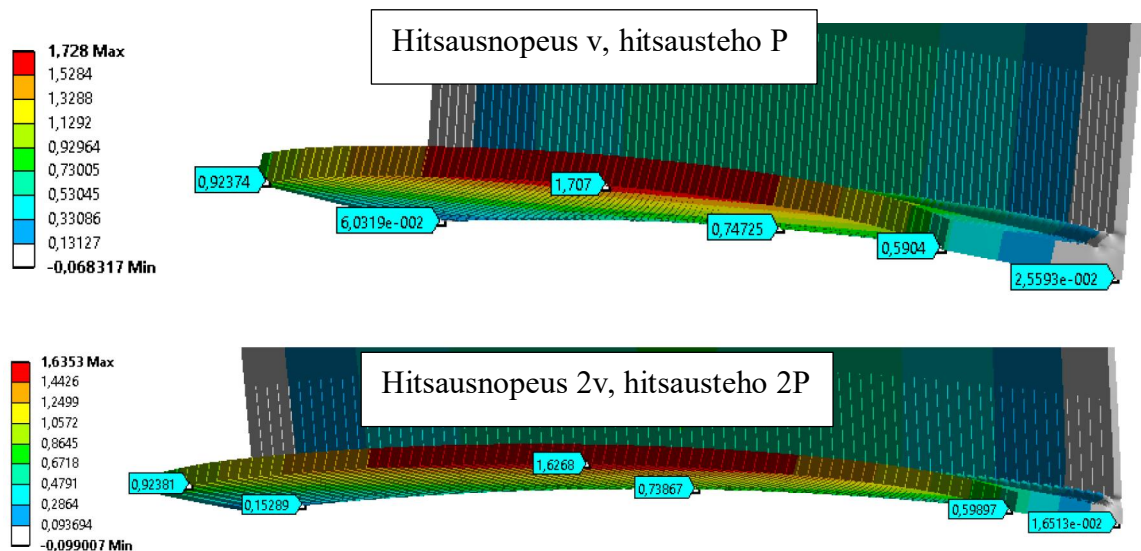
pienemmät muodonmuutokset eli pienempi kaareutuma ja kulmavetäymä. Tässäkin poikkeuksena ovat ohuet laipat kulmavetäymän suhteen samoista syistä kuin hitsausnopeuden kasvatuksella. Oleellista on lämmöntuonti *mittayksikköä kohden*.

Lämmöntuonnin kaavasta (5) nähdään, että hitsausnopeus on kaavan jakajassa, jolloin sen kasvattaminen pienentää lämmöntuontia ja täten myös muodonmuutoksia. Hitsausteholla puolestaan vaikutetaan kaavan osoittajaan. Kaavasta nähdään, että hitsaustehon pienetessä loogisesti myös lämmöntuonti mittayksikköä kohden pienenee, mikä vähentää muodonmuutoksia. Hitsaustehoa voidaan pienentää laskemalla hitsaukseen käytettävää sähkövirtaa tai jännitettä.

Kuvassa 16 esitetyt hitsausnopeuden aiheuttamat poikkileikkauskuvat voitaisiin siis säävuttaa myös pienentämällä laserin tehoa sen sijaan, että kasvatettaisiin hitsausnopeutta. Lämmöntuonti mittayksikköä kohden on hallitseva tekijä itse hitsausprosessin aiheuttamien muodonmuutosten synnyn kannalta [14]. Luodut simulaatiomallit tukevat väitettä. Kuvassa 49 esitetään kaareutumien vertailutapaus profiilille, jonka lämmöntuonti per mittayksikkö on mallien välillä pidetty samana, mutta toisessa mallissa hitsausnopeus sekä hitsausteho on kaksinkertaistettu. Kuvassa 50 esitetään saman laskennan tulokset kulmavetäymän suhteen.



Kuva 49. Kaareutuma yllä käyttäen hitsaustehoa P ja hitsausnopeutta v . Kaareutuma alla käyttäen hitsaustehoa $2P$ ja hitsausnopeutta $2v$.



Kuva 50. Kulmavetäymä yllä käyttäen hitsaustehoa P ja hitsausnopeutta v . Kaareutuma alla käyttäen hitsaustehoa $2P$ ja hitsausnopeutta $2v$.

Kuvista 49 ja 50 nähdään, että kaareutumien tulokset ovat simulaatiomallien kesken käytännössä samat. Kulmavetäymän osalta ero on noin 0,1 mm palkin pituuden ollessa 1200 mm. Mallien perusteella voidaan päätellä, että mikäli lämmöntuonti mittayksikköä kohden pysyy samana ei hitsausnopeudella tai -teholla ole muodonmuutosten näkökulmasta suurta merkitystä. Tulokset esitetään taulukoituna taulukossa 8.

Taulukko 8. Ero kulmavetäymässä ja kaareutumassa, kun lämmöntuonti mittayksikköä kohden pidetään vakiona, mutta hitsaustehoa ja nopeutta kasvatetaan

Kaareutuma (P, v)	Kaareutuma ($2P, 2v$)	Kulmavetäymä (P, v)	Kulmavetäymä ($2P, 2v$)
0,68509 mm / 1,2 m	0,68596 mm / 1,2 m	0,56–0,96 mm	0,58–0,88 mm

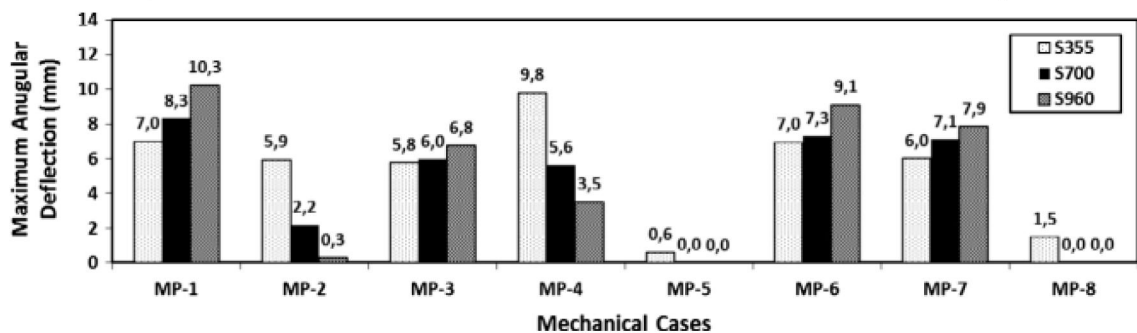
5.2.2 Materiaali

Mekaanisista materiaaliominaisuuksista kimmokerroin, myötölujuus ja lämpölaajenemiskerroin vaikuttavat jokainen osaltaan muodonmuutoksiin. Vastaavasti termisistä ominaisuuksista ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus ovat tärkeitä tekijöitä. [18] Myötölujuuden vaikutus hitsin puristavaan voimaan on vähäinen [14]. Kimmokerroimen kasvattaminen puolestaan kasvattaa liitoksen jäykkyyttä, mikä johtaa pienempiin muodonmuutoksiin. Lämpölaajenemiskertoimen pieneminen loogisesti pienentää muodonmuutoksia, koska kappale laajenee vähemmän hitsauksen aikana.

Termisistä materiaaliominaisuuksista ominaislämpökapasiteetti kuvaa lämpömäärää massayksikköä kohden, joka materiaalille tulee syöttää $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilan nousun saavuttamiseksi. Tällöin voidaan päätellä, että mitä pienempi on materiaalin ominaislämpökapasiteetti, sitä suurempia ovat muodonmuutokset, koska tällöin lämpötila nousee korkeammaksi. Vastaavasti lämmönjohtavuuden näkökulmasta hyvin lämpöä johtavilla materiaaleilla havaitaan pienempiä muodonmuutoksia, koska lämpö jakautuu kappaleeseen tasaisemmin, mikä tasaa lämpötilahuippuja ja pienentää lämpötilagradienttia. [12, 45] Lämmönjohtavuus on pienempi korkealujuuksisilla teräksillä. [18]

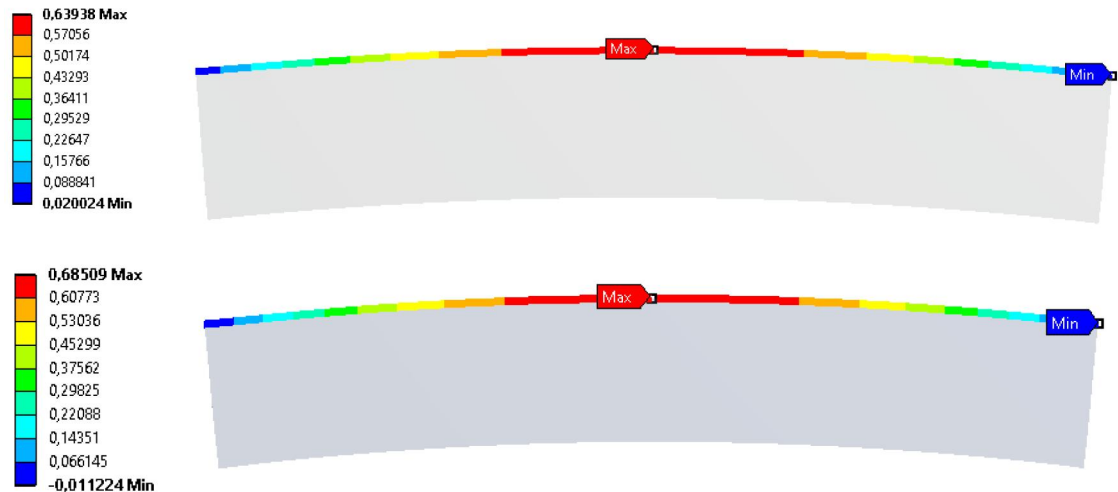
Bhatti ja Barsoum ovat tutkineet materiaalin ja materiaaliominaisuuksien lämpötilariippuvuuden vaikutusta hitsaamisen aiheuttamaan kulmavetäymään [18]. Kuvassa 51 on esitelty eri materiaaliparametrien lämpötilariippuvuuden huomioon ottavien mallien vertailu eri teräslaatuojen välillä. Tutkimuksen tuloksista nähdään, että muodonmuutosten näkökulmasta tärkeintä on mallintaa myötölujuus lämpötilariippuvana. Laskentamallit, joissa ei ole tehty näin, antavat epäluotettavia tuloksia kulmavetäymälle. Tässä työssä luotujen simulaatiomallien mukaan kaareutuma kasvaa myötölujuuden noustessa kuten odotettiin, mutta kulmavetäymä pienenee, kuten kuvissa 52 ja 53 nähdään.

Mechanical case	Mechanical material properties		
	Young's modulus E	Yield stress σ_Y	Coefficient of thermal expansion α
MP-1	$E = E(T)$	$\sigma_Y = \sigma_Y(T)$	$\alpha = \alpha(T)$
MP-2	Constant	Constant	Constant
MP-3	Constant	$\sigma_Y = \sigma_Y(T)$	Constant
MP-4	Constant	Constant	$\alpha = \alpha(T)$
MP-5	$E = E(T)$	Constant	Constant
MP-6	Constant	$\sigma_Y = \sigma_Y(T)$	$\alpha = \alpha(T)$
MP-7	$E = E(T)$	$\sigma_Y = \sigma_Y(T)$	Constant
MP-8	$E = E(T)$	Constant	$\alpha = \alpha(T)$

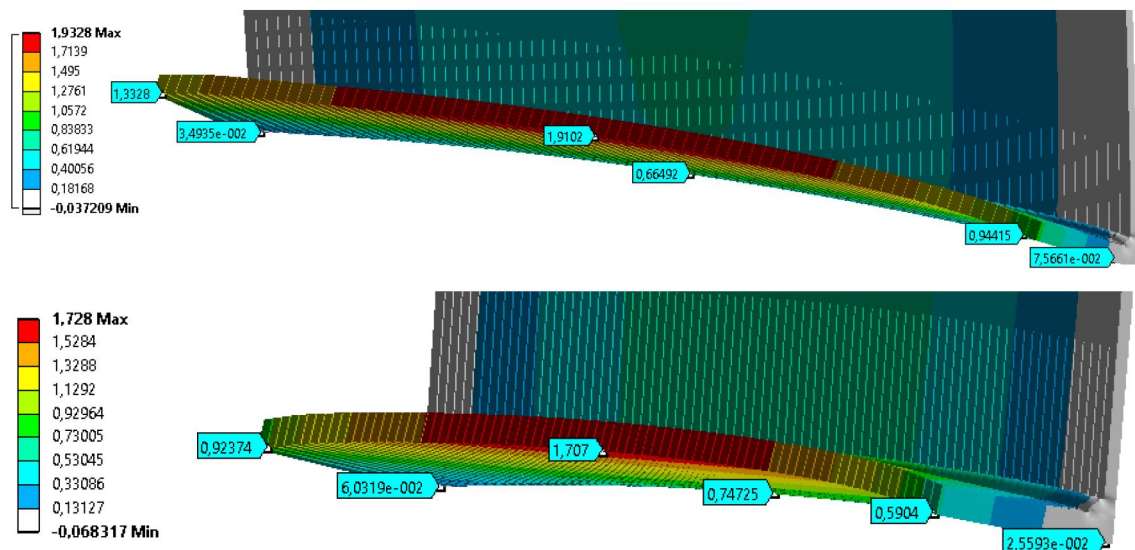


Kuva 51. Hitsaamisen aiheuttama kulmavetäymä teräksillä S355, S700 ja S960 erilaisilla lämpötilariippuvilla materiaaliparametreilla 300mm leveässä, 6mm paksussa T-profiilin laipassa. [18]

Materiaaliparametrien lämpötilariippuvuuden lisäksi oleellisia tekijöitä voivat olla lämmetessä ja jäähtyessä tapahtuvat faasimuutokset. Tämä on tapaus erityisesti korkealujuusteräksillä [12, 18]. Tämän työn yhteydessä käytetty TEPA ottaa huomioon faasimuutokset ainoastaan lämpölaajenemiskertoimessa.



Kuva 52. S235 teräksestä koostuvan palkin kaareutuma yllä, S355 palkin kaareutuma alla



Kuva 53. S235 teräksestä koostuvan palkin kulmavetäymä yllä, S355 palkin kulmavetäymä alla

Eroavaisuus kulmavetäymässä johtuu todennäköisesti siitä, että plastisen venymän alue on suurempi matalamman myötölujuuden teräksessä ja sen vaikutus on mallinnetussa geometriassa kriittisempi, kuin plastisten venymien suuruuden pieneneminen. Eroavaisuudet voivat johtua myös yksittäisten testikappaleiden välisistä eroista kimmokertoimen lämpötilariippuvuudessa, sillä teräksen S235 kimmokerroin ei kuvan 27 mukaisesti ole määritetty kuin 700 °C lämpötilaan asti ja sen arvo ei laske yhtä pieneksi kuin teräksen S355 materiaalimallissa. Tulokset materiaalien välillä esitetään taulukossa 9.

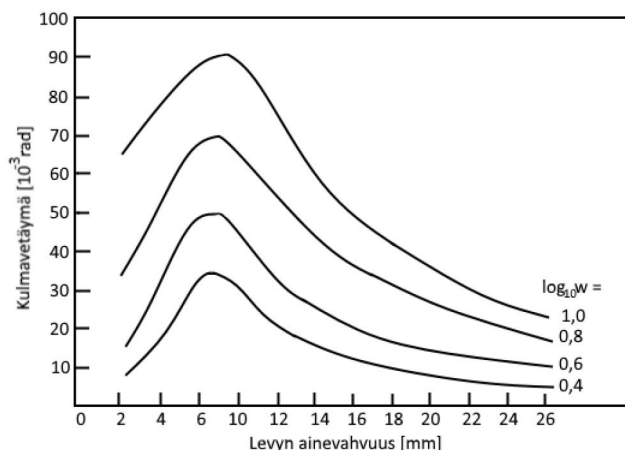
Taulukko 9. Ero kulmavetäymässä ja kaareutumassa, kun lämmöntuonti mittayksikköä kohden pidetään vakiona

Kaareutuma (S235)	Kaareutuma (S355)	Kulmavetäymä (S235)	Kulmavetäymä (S355)
0,63938 mm / 1,2 m	0,68509 mm / 1,2 m	0,87–1,29 mm	0,56–0,96 mm

5.2.3 Geometria

Hitsattavan rakenteen geometria vaikuttaa olennaisesti syntyviin muodonmuutoksiin. T-palkkien tapauksessa laipan paksuuden ja lämmöntuonnin suhde vaikuttaa kulmavetäymään; pienellä lämmöntuonnilla ja ohuella laipalla on pieni jäykkyys, mutta suuri lämpötilagradientti ainevahvuuden yli, mikä johtaa suureen kulmavetäymään. Suurella lämmöntuonnilla lämpötilagradientti pienenee, mikä pienentää kulmavetäymää ohuessa laipassa. Kuvassa 10 esitetään hitsaamisen aiheuttama lämpötilajakauma laippalevyn ainevahvuuden yli. Ilmiön johdosta ohuille laipoilla lämmöntuontia kasvattamalla voidaan saavuttaa pienempi kulmavetäymä. Laipan paksuuden kasvaessa myös sen jäykkyys kasvaa, mikä pienentää kulmavetäymää paksuissa laipoissa.

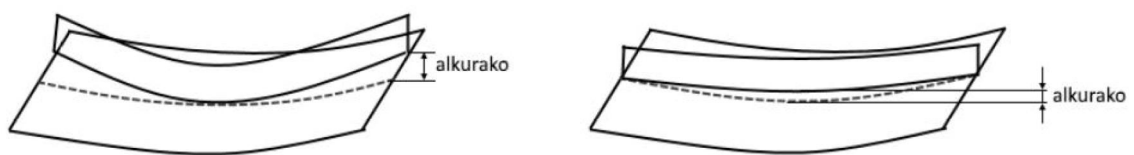
Optimaalisella jäykkyyden ja lämmöntuonnin suhteen valinnalla voidaan siis vaikuttaa merkittävästi kulmavetäymän suuruuteen. Käytännössä ohuilla laipoilla tulee muodonmuutosten näkökulmasta pyrkiä tarpeeksi suureen lämmöntuontiin, kun taas paksuilla laipoilla (> 8 mm) pyritään pieneen lämmöntuontiin, kuten kuvasta 54 selviää. Laipan paksuuden tulisi olla jäännösjännitysten minimoinnin näkökulmasta mahdollisimman ohut. [16]



Kuva 54. Laipan paksuuden ja kulmavetäymän riippuvuus lämmöntuonnista; w on parametri, joka ottaa huomioon hitsin dimensiot (jalkamitan), materiaalin tiheyden ja hitsauksen hyötösuhteen ($w = \rho D^2 / 200 \eta$). Suurempi jalkamitta saavutetaan korkeammalla lämmöntuonnilla mittayksikköä kohden. [7]

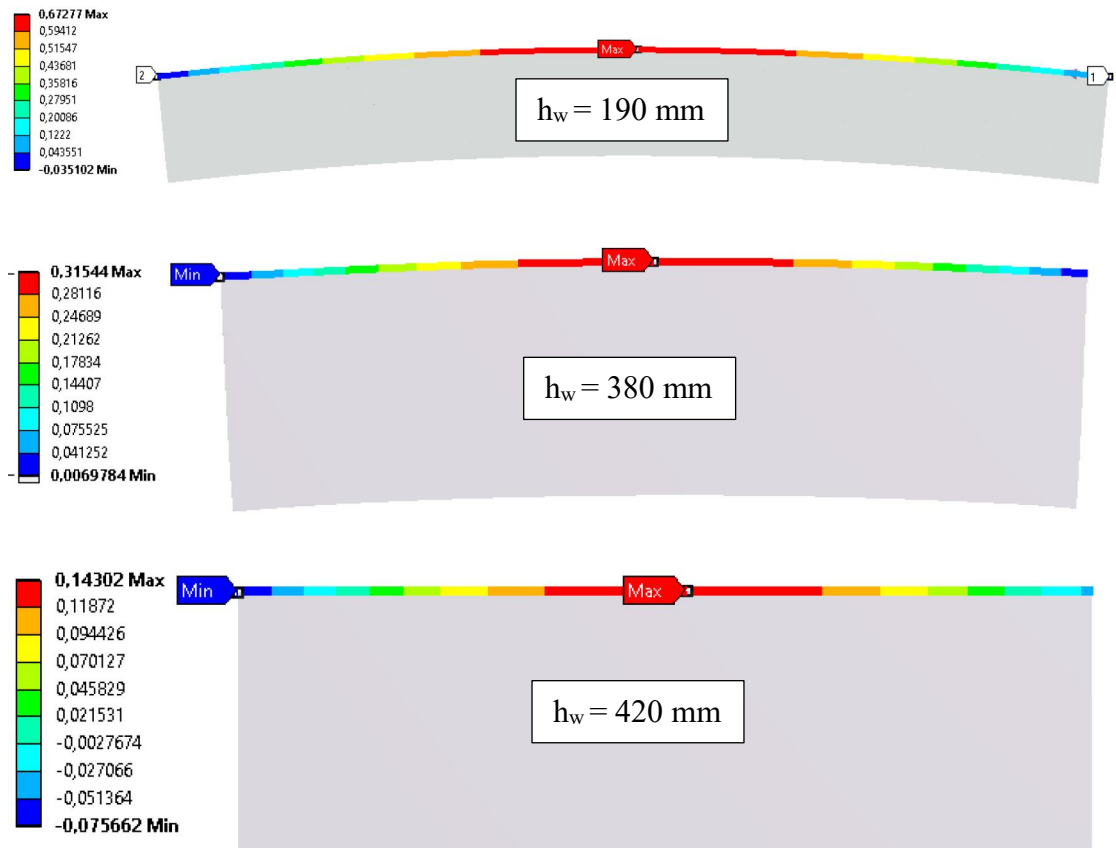
Kaareutumaa vaikuttaa luonnollisesti profiilin jäykkyys ja hitsauspisteen sijainti suhteessa hitsattavan poikkileikkauksen vetojäykkyysskeskiöön, koska kaareutumaa aiheuttaa hitsausalueen kutistumisen luoman voiman ja epäkeskisyyden aiheuttama momentti palkin matkalla. Korkeammalla profiililla saavutetaan suurempi neliömomentti ja tätä kautta suurempi jäykkyys, mutta toisaalta silloin myös hitsauspisteen etäisyys vetojäykkyysskeskiöön kasvaa. Aukottomalla uumalevyllä jäykkyys kasvaa suhteessa epäkeskisyyttä voimakkaammin, jolloin kaareutuma on sitä pienempi mitä korkeampi umpinainen uumalevy on. Aukotetuilla uumalevyillä on tapauskohtaista, kumman vaikutus on hallitseva. Esimerkiksi jos uumalevyn vetojäykkyysskeskiön alapuolelle tehdään aukkoja, se nostaa vetojäykkyysskeskiön paikkaa, mutta pienentää jäykkyyttä. Tällöin hitsaamisen aiheuttama kaareutuma kasvaa. Vastaavasti jos tehdään matalia reikiä vetojäykkyysskeskiön yläpuolelle, se pienentää epäkeskisyyttä sekä profiilin jäykkyyttä. Profiilin jäykkyyden suhteellinen pieneneminen on kuitenkin marginaalista verrattuna epäkeskisyyden pienenemiseen, jolloin hitsaamisen aiheuttama tässä tapauksessa kaareutuma pienenee.

Tutkimuksen [21] mukaan toisiinsa hitsattavien osien välissä oleva alkurako vaikuttaa olennaisesti hitsausmuodonmuutoksiin. Kuvassa 55 esitetään tilanteet, jossa yhteen hitsattavan jäykisteen ja levyn välillä on rako joko keskellä liitosta tai sen päässä. Päädyissä oleva rako (kuvassa vasemmalla) kasvattaa kaareutumaa ja keskellä oleva rako (kuvassa oikealla) pienentää kaareutumaa. Alkurakojen korjaamiseksi kappaleet pakotetaan yhteen, minkä seurauksena päädyissä olevien rakojen sulkeminen aiheuttaa taipumaa samaan suuntaan hitsauksen aiheuttaman kaareutumaa kanssa. Vastaavasti keskellä olevan rakon sulkeminen aiheuttaa kaareutumaa vastakkaiseen suuntaan hitsauksen aiheuttaman kaareutumaa kanssa, mikä pienentää lopullista kaareutumaa. [21] Vastaavasti alkurakojen lisäksi myös muunlaiset poikkeamat geometriassa vaikuttavat hitsatessa syntyviin muodonmuutoksiin [54].



Kuva 55. Alkurako päädyissä (vasen) ja alkurako keskellä (oikea) [21]

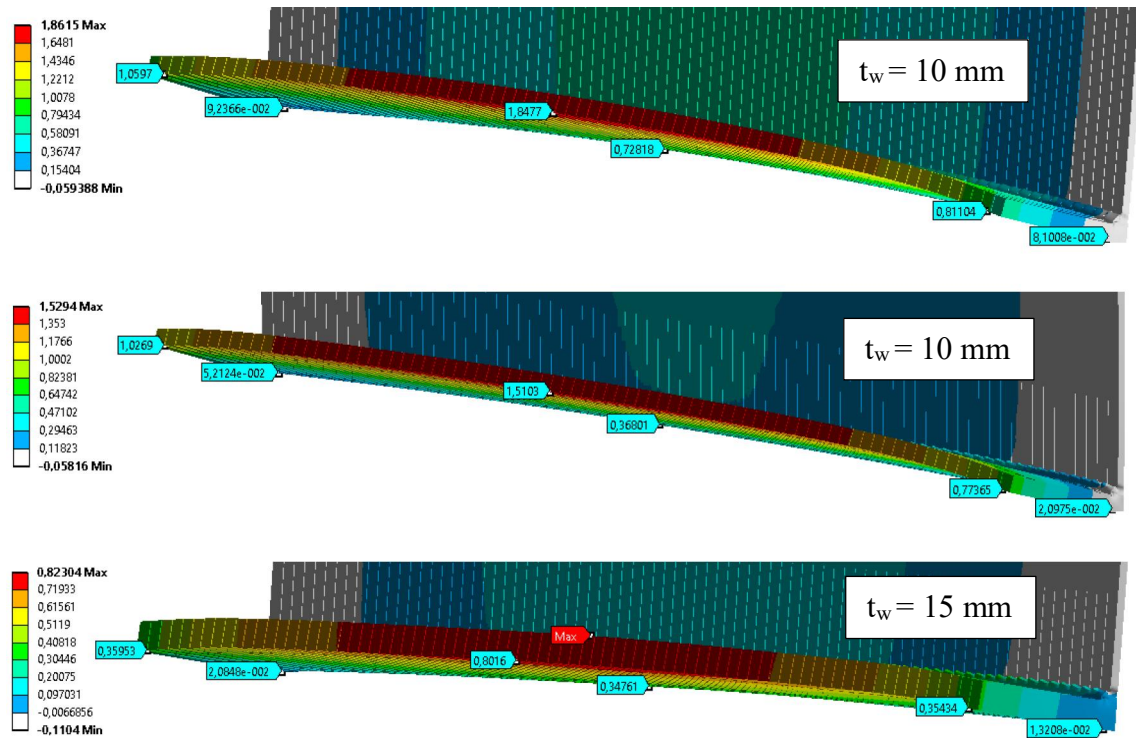
Kuvassa 56 esitetään uuman korkeuden vaikutus palkin kaareutumaa, kun muut parametrit pidetään vakioituna. Odotetusti korkeammalla uumalla havaitaan vähemmän kaareutumaa, koska profiilin jäykkyys kasvaa. Uumalevyn ollessa tarpeeksi korkea ei esilämmityksiä tarvita suoristamaan profiilia, ellei kulmavetäymän korjaus sitä erikseen vaadi. Tällöin vaikutuksia voidaan kompensoida uuman esilämmityksellä. Kuvasta 56 nähtävät tulokset esitetään myös taulukoituna taulukossa 10.



Kuva 56. Uuman korkeuden vaikutus kaareutumaaan

Taulukko 10. Uuman korkeuden vaikutus kaareutumaaan

Uuman korkeus	Kaareutuma
190 mm	0,7 mm / 1,2 m
380 mm	0,32 mm / 1,2 m
420 mm	0,21 mm / 1,2 m



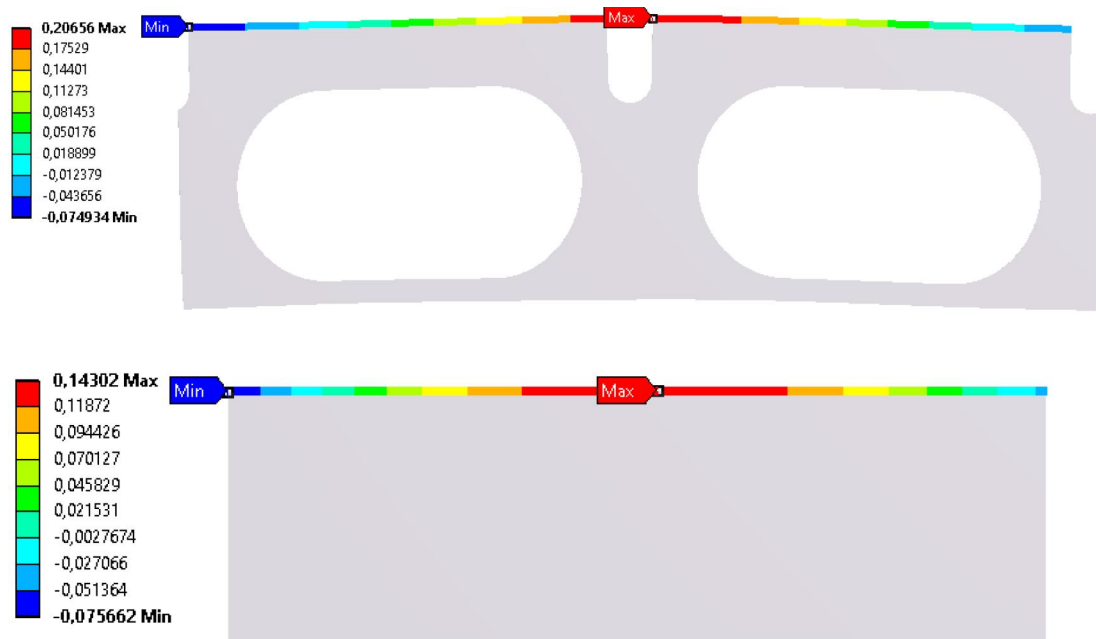
Kuva 57. Laipan paksuuden vaikutus kulmavetäymään

Kuvassa 57 esitetään laipan paksuuden vaikutus kulmavetäymään, kun muut parametrit pidetään vakiona. Kahdessa ylemmässä kuvassa laipan paksuus on 10 mm, mutta uuman korkeus muuttuu. Tuloksista huomataan, että vaikka kaareutuma kasvaa uuman korkeuden vähentyessä, ei se vaikuta kulmavetäymään. Kasvatettaessa laipan paksuutta 15 millimetriin kulmavetäymä pienenee, koska laipan jäykkyys kasvaa. Ohuemmille laipoille ei ole suoritettu simulaatioita, mutta odotettavasti kulmavetäymä lähtee pieneneään laipan ainevahvuuden ohentuessa tarpeeksi johtuen lämpötilagradientin pienemisestä laipan ainevahvuuden yli, kuten kuvan 54 käyristä nähdään. Laipan paksuuden vaikutus kulmavetäymään edellä kuvatussa tilanteessa esitetään taulukossa 11.

Taulukko 11. Laipan paksuuden vaikutus kulmavetäymään

Laipan paksuus	Kulmavetäymä
10 mm	0,73–1,12 mm
15 mm	0,34–0,45 mm

Alla on vertailtu aukottoman ja aukollisen T-palkin hitsaamisen aiheuttamaa kaareutumaa kuvassa 58. Kuvasta nähdään, että ero taipumassa on aukotetun ja aukottoman palkin välillä varsin pieni; noin 0,06 mm 1200 mm matkalla. Alla esitetyllä aukotustavalla aukollisen palkin kaareutuma on hieman suurempi. Toisaalta, koska taipumaa on mitattu nyt uumalevyn yläreunasta eikä vetojäykkyyskeskiön läpi kulkevalta kimmoviivalta, ei tulos välttämättä edusta kimmoviivan taipumia kovin hyvin. Tulokset esitetään taulukoituna taulukossa 12.



Kuva 58. Uumalevyn yläreunan kaareutuma aukotetulla ja aukottomalla, 1200 mm pitkällä T-palkilla

Taulukko 12. Kuvassa 58 esitettyjen aukotusten vaikutus kaareutumaan

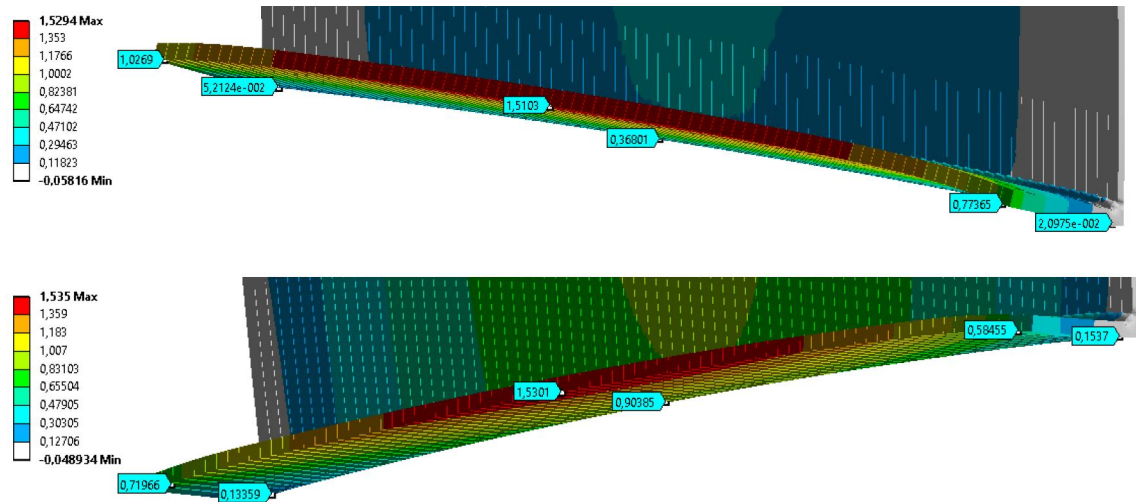
Geometria	Kaareutuma
Aukotettu	0,28 mm / 1,2 m
Aukoton	0,21 mm / 1,2 m

Tiivistettynä T-palkin hitsausmuodonmuutoksia voidaan minimoida geometrian valinnan avulla valitsemalla laipan paksuus hitsaustehosta riippuen riittävän ohueksi tai tarpeeksi paksuksi ja uuman korkeus mahdollisimman suureksi. Oikein sijoitetuilla aukotuksilla uumalevyssä voidaan myös pienentää kaareutumaa.

5.2.4 Esilämmitys

Esilämmitys on tehokas tapa pienentää hitsausmuodonmuutoksia. Esilämmityksen sijainnin ja tehon valinta vaatii kuitenkin asiantuntemusta ja tässä simuloinnin hyödyntäminen osoittautuu tehokkaaksi apuvälineeksi. Esilämmityksen pääasiallisena tavoitteena on aiheuttaa toiseen tai molempiin toisiinsa hitsattaviin kappaleisiin alkudeformaatio hitsausmuodonmuutoksia vastakkaiseen suuntaan, joilla kompensoidaan hitsaamisesta aiheutuvia muodonmuutoksia.

Kulmavetäymää voidaan ehkäistä T-palkkeja hitsatessa laipan alapuoleisella lämmityksellä, koska se pienentää lämpötilagradienttia esilämmitysilmion ansiosta sekä aiheuttaa tarpeeksi suurella teholla plastista venymää myös toiselle puolelle laippalevyä. Väitettä voidaan tukea kuvassa 59 esitetyllä simulaatiomallilla sekä mittaustuloksilla, joita on esitetty taulukossa 5. Kuvan 59 tulokset esitetään taulukoituna taulukossa 13.

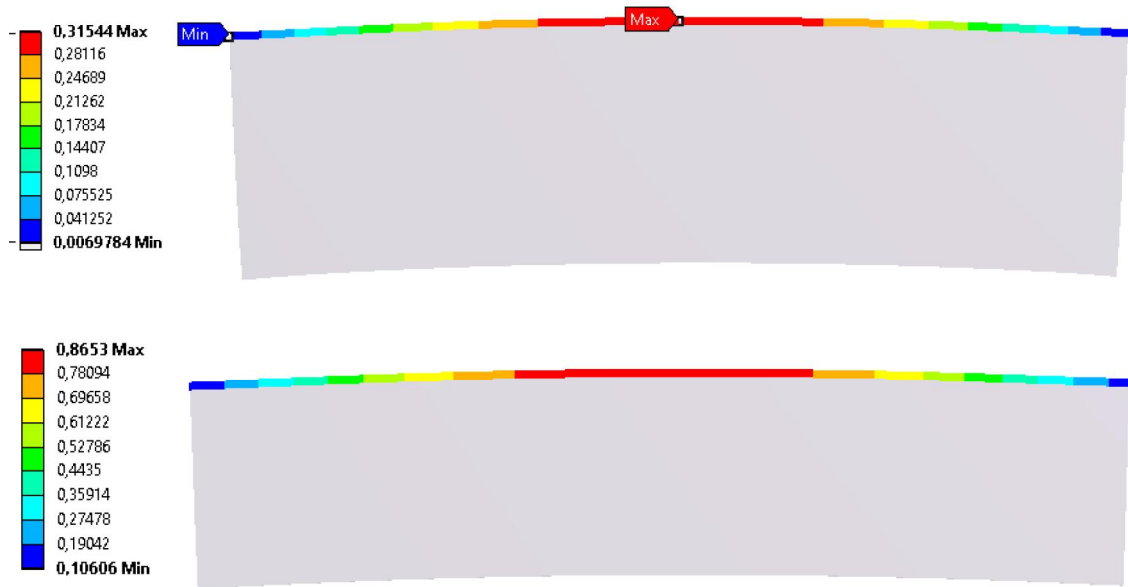


Kuva 59. 10 mm vahvuisen laipan kulmavetäymä ilman laipan esilämmitystä (yllä) ja 20 kW esilämmityksellä (alla). Laskentamalli aliarvioi muodonmuutoksia hieman liian paljon esilämmitettyä puolta kohti.

Taulukko 13. Esilämmityksen vaikutus kulmavetäymään 10mm paksulla laipalla

Esilämmitysteho laipan alla	Kulmavetäymä
0 kW	0,75–1,15 mm
20 kW	0,43–0,63 mm

Kaareutumaa voidaan T-palkkien tapauksessa ehkäistä uuman lämmityksellä, kuten luvussa 3.2 todetaan. Uuman lämmittäminen molemmilta puolilta luo symmetrisen lämmitystilanteen, joka ehkäisee kaareutuman syntymistä sivusuunnassa. Mikäli levyjä ei ole silloitushitsattu toisiinsa molemmista päistään niin uuman lämmittäminen pidentää uumalevyä, jolloin se jäähtyessään tasapainottaa hitsausmuodonmuutoksia pyrkien kutistumaan. Jos uumalevyä lämmitetään sen vetojäykkyykskeskiön alapuolelta ennen hitsaamista, uumalevyyn aiheutuva kaareutuma on hitsausmuodonmuutoksille vastakkaisuuntainen ja kompensoi hitsausmuodonmuutoksia myös tämän ilmiön kautta. Pituseron vaikutus on todennettu tutkimuksessa [14] ja laipan alapuolen esilämmityksen vaikutus testihitsauksissa ja simulaatioissa, joiden tuloksia esitetään kuvassa 60 ja taulukossa 14.



Kuva 60. 380 mm korkean uuman palkin kaareutuma ilman esilämmitystä (yllä) ja laipan alapuolisella 20 kW esilämmityksellä (alla). Esilämmitetyn palkin kaareutuma on huomattavasti suurempi, koska laippa on lämpölaajentunut esilämmityksen ansiosta enemmän kuin uumalevy. Laskentamalli aliarvioi muodonmuutoksia hieman liian paljon esilämmitettyä puolta kohti.

Taulukko 14. Esilämmityksen vaikutus kaareutumaa kuvan 60 tilanteen mukaisesti

Esilämmitysteho laipan alla	Kaareutuma
0 kW	0,32 mm / 1,2 m
20 kW	0,96 mm / 1,2 m

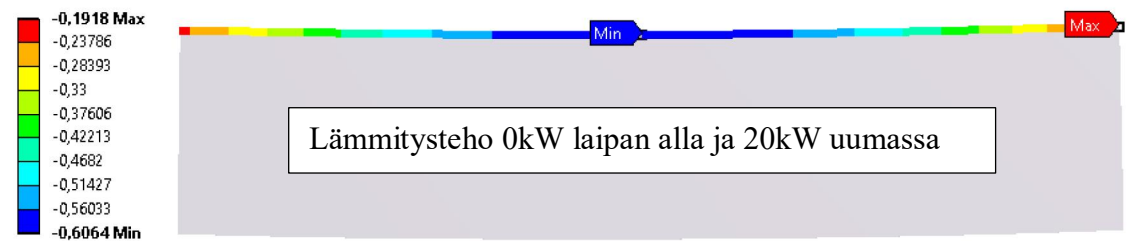
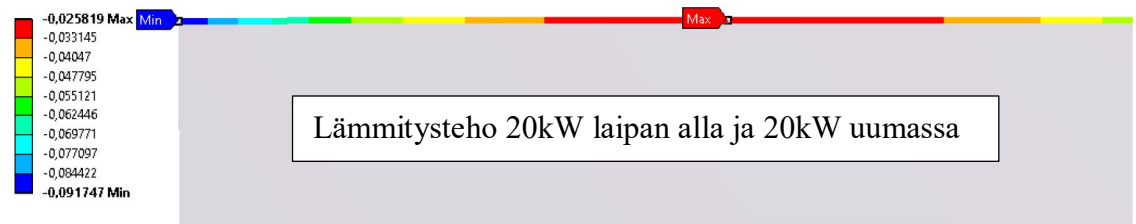
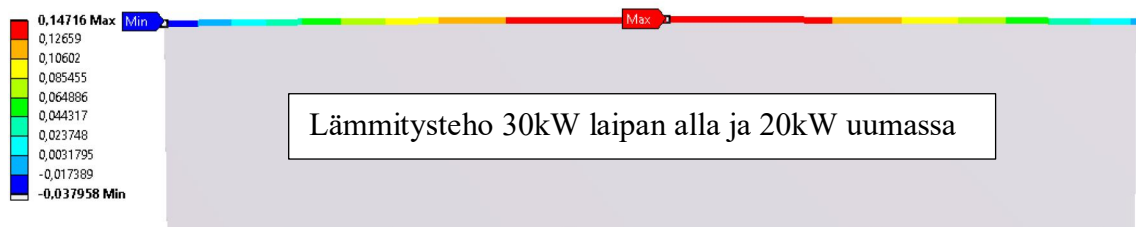
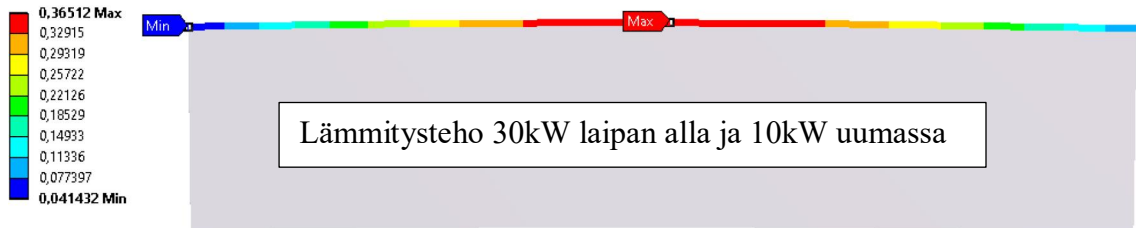
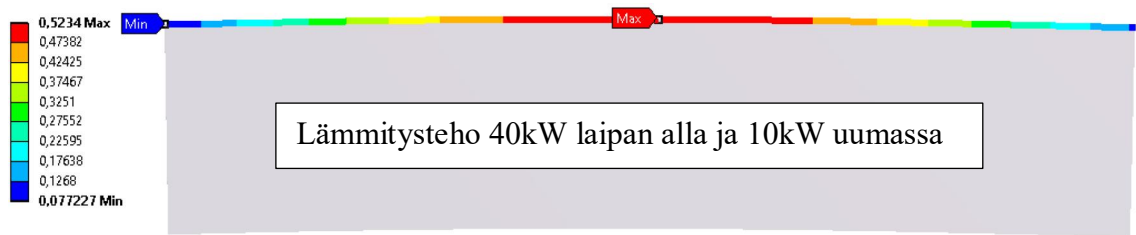
Kuvassa 61 esitetään erilaisilla uuman ja laipan lämmöntuonneilla saatuja simulointituloksia palkin kaareutumalle. Tuloksista huomataan, että pienentämällä laipan lämmöntuontia tai vastaavasti kasvattamalla uuman lämmöntuontia saadaan palkki kaareutumaan enemmän alaspäin. Kaareutumatulokset esitetään myös taulukossa 15.

Hitsausnopeuden vaikutusta esilämmitettyihin tapauksiin ei ole testattu hitsaustesteillä, joten niiden osalta mallien luotettavuutta ei voida verifioida. Kuvassa 62 vertaillaan simuloinnin avulla aukotetun palkin kaareutumaa, kun sitä lämmitetään laipan alapuolelta 40 kW teholla ja hitsausnopeus kaksinkertaistetaan. Simulaatiomallin tuloksista huomataan, että korkeammalla hitsausnopeudella muodonmuutokset ovat pienempiä. Tämä johtuu siitä, että lämmöntuonti mittayksikköä kohden pienenee hitsausnopeuden kasvaessa. Kuvassa 63 esitetään hitsausnopeuden vaikutus kulmavetäymään, joka myös odotetusti pienenee hitsausnopeuden kasvaessa. Tulokset esitetään taulukoituna taulukossa 16.

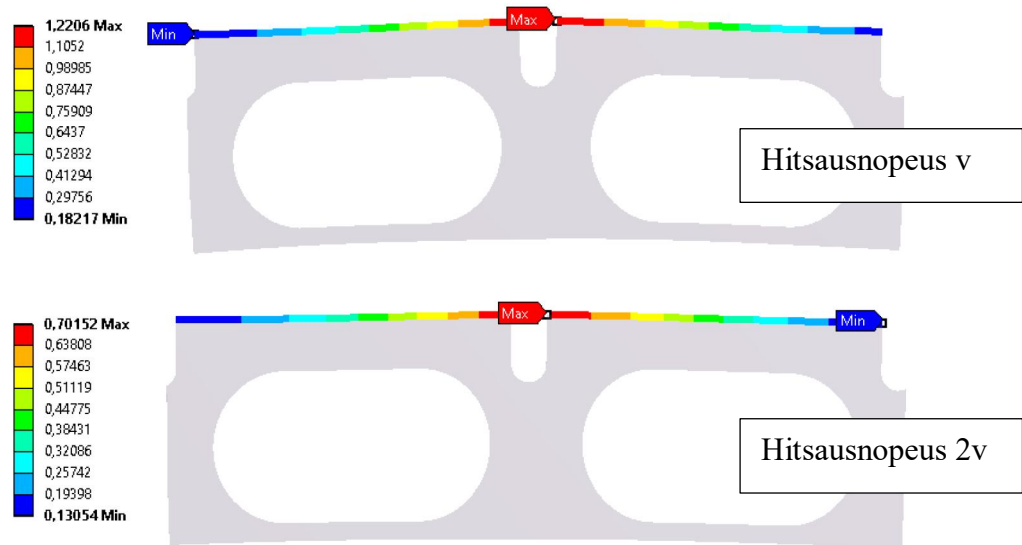
Kuvassa 64 esitetään aukotusten vaikutus tapaukseen, jossa laippaa on esilämmitetty 40 kW teholla sen alapuolelta. Aukollinen palkki kaareutuu tässä tapauksessa aukotonta palkkia huomattavasti enemmän. Tämä johtuu aukotusten lisäksi siitä, että mallissa palkin päädyissä on matalampi poikkileikkaus, mikä kasvattaa kaareutumaa yhdessä päätyvaikutusten kanssa.

Taulukko 15. *Esilämmityksen vaikutus kaareutumaan*

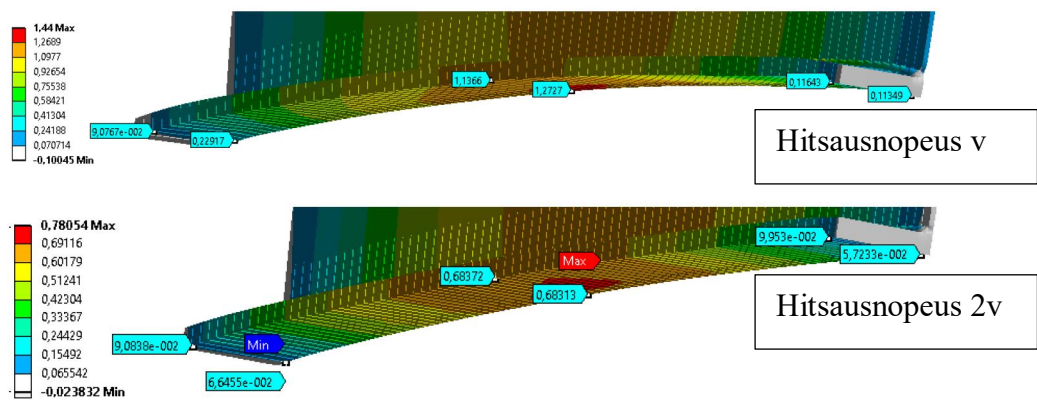
Esilämmitysteho laipan alla	Esilämmitysteho uumassa	Kaareutuma
0 kW	20 kW	-0,41 mm / 1,2 m
20 kW	20 kW	-0,07 mm / 1,2 m
30 kW	20 kW	0,18 mm / 1,2 m
30 kW	10 kW	0,32 mm / 1,2 m
40 kW	10 kW	0,45 mm / 1,2 m



Kuva 61. Kaareutumalan simulointitulokset (siirtymä pystysuunnassa) erilaisilla esilämmityspareetreilla. Laskentamalli aliarvioi muodonmuutoksia hieman liian paljon esilämmitettyä puolta kohti.



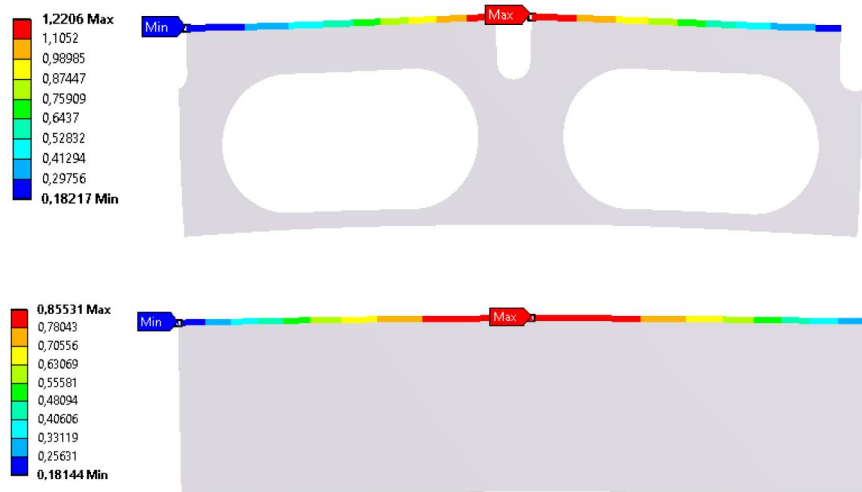
Kuva 62. Hitsausnopeuden vaikutus kaareutumaa esilämmitetyllä laipalla



Kuva 63. Hitsausnopeuden vaikutus kulmavetäymään esilämmitetyllä laipalla

Taulukko 16. Hitsausnopeuden vaikutus esilämmitetyssä tilanteessa kuvien 62 ja 63 mukaisesti aukotetulle T-palkille

Hitsausnopeus	Kaareutuma	Kulmavetäymä
v (93 cm / min)	1,04 mm / 1,2 m	-0,13..0 mm
2v (186 cm / min)	0,57 mm / 1,2 m	0..0,04 mm



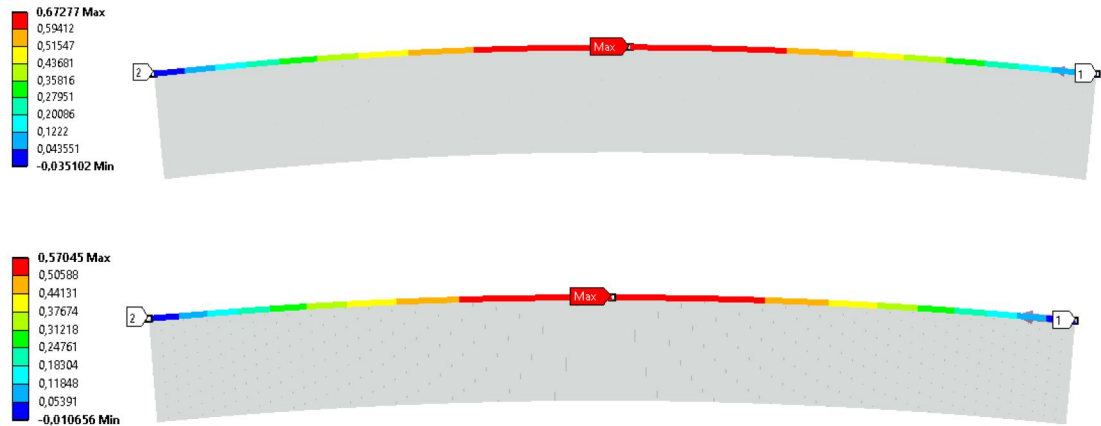
Kuva 64. Aukotusten vaikutus kaareutumaaan esilämmitetyllä laipalla

Taulukko 17. Kuvassa 64 esitettyjen aukotusten vaikutus kaareutumaaan esilämmitys-tilanteessa

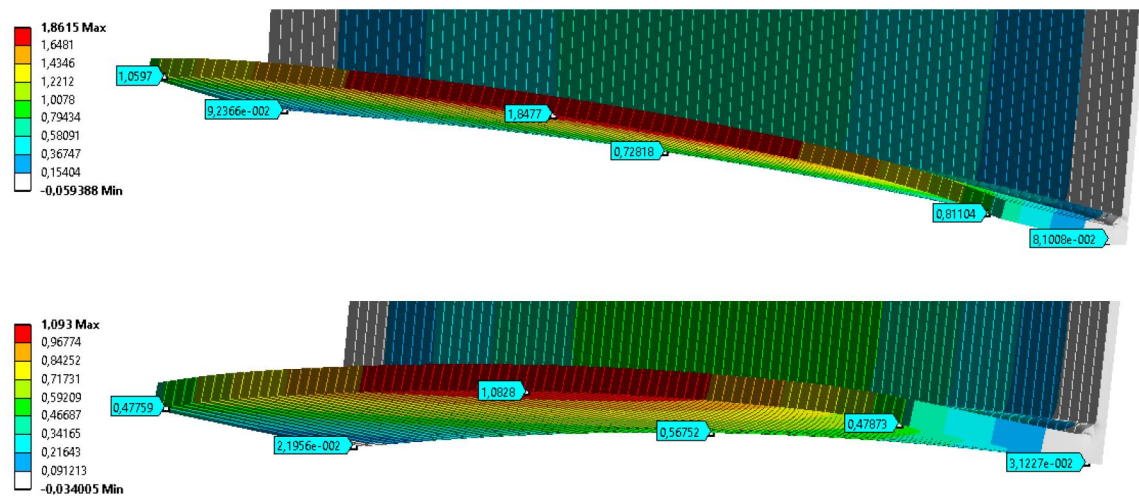
Geometria	Kaareutuma
Aukotettu	1,04 mm / 1,2 m
Aukoton	0,67 mm / 1,2 m

5.3 Lämmöntuonnin mallinnustekniikan vaikutus muodonmuutoksiin

TEPA -menetelmää esiteltäessä luvussa 4.1 todettiin, että lämmöntuonnin voi mallintaa palojen sijaan myös koko hitsille kerralla. Menetelmien eroja ja soveltuvuutta muodonmuutosten määrittämiseen on tutkittu tässä luvussa simulaatioiden ja aiheesta tehtyjen tutkimuksien avulla.



Kuva 65. Kaareutuma hitsausnopeuden mukana tuodulla lämmöllä (yllä) ja kerralla koko hitsille tuodulla lämmöllä (alla)



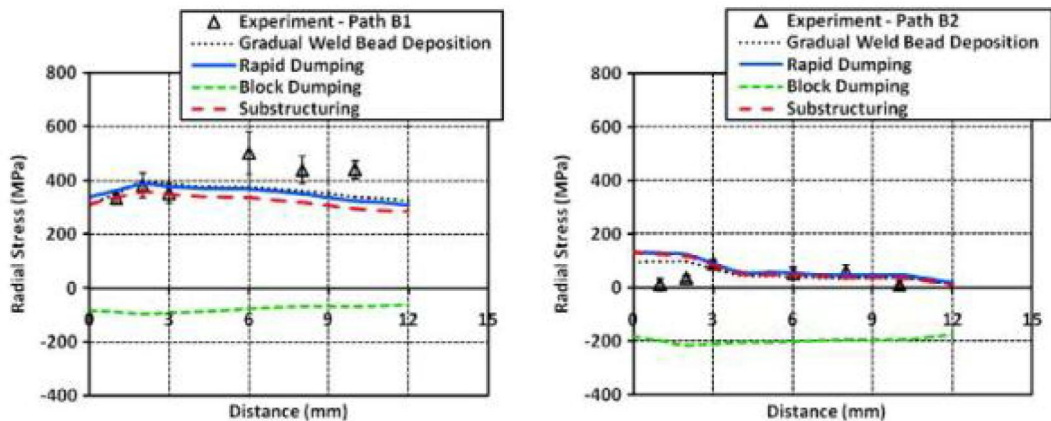
Kuva 66. Kulmavetäymä hitsausnopeuden mukana tuodulla lämmöllä (yllä) ja kerralla koko hitsille tuodulla lämmöllä (alla)

Simulaatiotuloksista nähdään kuvien 65 ja 66 perusteella, että kerralla tuotu lämpö enustaa yhden vertailumallin perusteella kaareutumaa hyvin, mutta aliarvioi kulmavetäymää. Tulokset esitetään taulukossa 18.

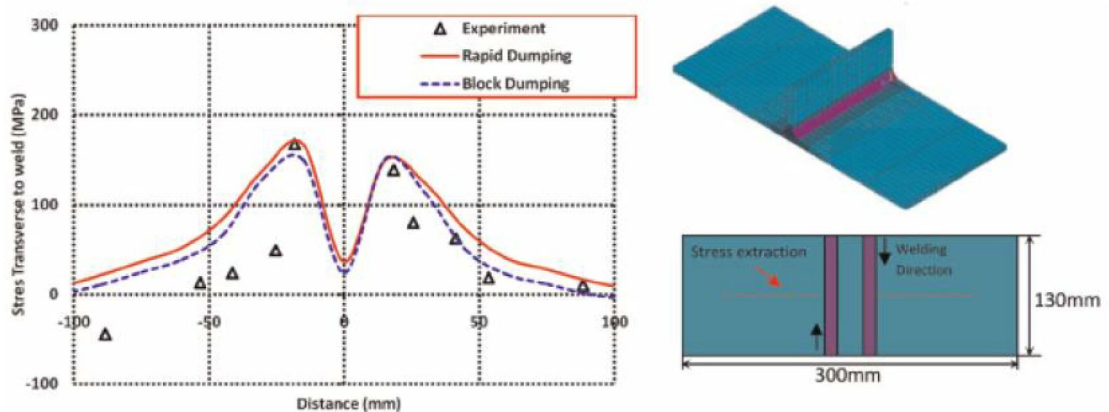
Taulukko 18. Kuvissa 65 ja 66 esitettyjen mallinnustapojen vaikutus kaareutumaan

Mallinnustapa	Kaareutuma	Kulmavetäymä
Lämmöntuonti paloittain	0,70 mm / 1,2 m	0,73–1,12 mm
Lämmöntuonti kerralla	0,58 mm / 1,2 m	0,45–0,52 mm

Z. Barsoumin tutkimuksen [55] perusteella kerralla tuodulla hitsillä saavutetaan heikosti todellisuutta vastaavat arviot jäännösjännityksille kaareutuvalla yksipuoliselle pienahitsille, kuten kuvasta 67 nähdään. Toisaalta T-liitokselle mallinnustapa antaa hyvin testituloksia vastaavia jäännösjännitystuloksia, kuten kuvasta 68 nähdään. Mallinnustavan luotettavuudesta muodonmuutosten kuvantamisen suhteen ei voida olla vakuuttuneita kaikille rakenteille, mutta kapean otannan perusteella T-liitoksia pystytään mallintamaan kohtuullisella tarkkuudella tuomalla hitsin geometria ja lämpö koko pituudelta kerralla malliin.



Kuva 67. Jäännösjännitys eri lämmön- ja hitsigeometrian tuontimenetelmillä. Gradual Weld Bead Deposition vastaa tässä työssä käytettyä, paloittain lämmittävää menetelmää. Block Dumping vastaa koko hitsin lämmön ja geometrian kerralla malliin tuomista. [55]



Kuva 68. Poikittaissuuntaiset jäännösjännitykset T-liitoksessa. Block dumping menetelmän tulokset vastaavat mitattuja jäännösjännityksiä hyvin. [55]

Menetelmän soveltamisesta tulisi tehdä useampia simulaatiota sen toimivuuden takaamiseksi T-liitosten muodonmuutosten määrittämisessä. Hitsin geometrian ja lämmön tuominen kerralla ei sovellu tapauksiin, joissa palkkeja esilämmitetään, koska tällöin levyt eivät pääse lämpölaajenemaan toisensa suhteen koko hitsin geometrian ollessa mallissa jo valmiina ja näin sitoen levyt toisiinsa jo alkutilanteessa. Osittain tästä syystä tässä työssä on päätetty käyttää hitsiä paloittain lämmittävää mallinnusmenetelmää, jotta vertailu myös esilämmitettyjen ja esilämmittämättömien mallien välillä on luotettavampaa.

6. YHTEENVETO

Hitsausparametreista muodonmuutoksiin vaikuttaa eniten lämmöntuonti mittayksikköä kohden. Muita merkittäviä tekijöitä ovat hitsattavan rakenteen materiaali, geometria, hitsauksen aikaiset kiinnitykset sekä rakenteen häiriöt ennen hitsausta, kuten esimerkiksi osien välissä oleva alkurako ja siihen muista prosesseista jääneet jäännösjännitykset.

Keinoja vähentää kulmavetäymää T-palkeissa hitsauksen aikana ovat

- Hitsaustehon pienennys tai nopeuden kasvatus paksuja laippoja hitsatessa
- Hitsaustehon kasvatus tai nopeuden pienennys ohuita laippoja hitsatessa
- Laipan alapuoleinen esilämmitys
- Kiinnittimien käyttö

Keinoja vähentää kaareutumaa T-palkeissa hitsauksen aikana ovat

- Hitsaustehon pienennys tai nopeuden kasvatus
- Esilämmitys uumalevyssä
- Korkean profiilin käyttäminen
- Uumalevyn aukottaminen vetojäykkyykeskiön yläpuolelta

Hitsausprosessilla ei ole suurta merkitystä syntyvien pysyvien muodonmuutosten kannalta. Hitsausmenetelmää muutettaessa vaikutetaan yleensä ainoastaan lämmöntuontiin mittayksikköä kohden, joka on suuri kaarihitsausmenetelmillä ja pienempi laserhitsausmenetelmillä. Tämän johdosta kaarihitsausmenetelmillä tuotetaan suuremmat muodonmuutokset ja niiden kompensointi vaatii suurempien tehojen käyttöä esilämmityksessä.

Simuloinnin voidaan tulosten perusteella todeta olevan luotettava työkalu T-palkin hitsausmuodonmuutoksien määrittämisessä. Yksityiskohtaisella TEPA -laskentamallilla saadut tulokset vastasivat mittaustuloksia hyvin. Kaikkien simuloitujen mallien ja mittaustulosten eroavaisuudet tiivistetään taulukossa 19:

Taulukko 19. TEPA-simulaatiomallin ja mittaustulosten väliset eroavaisuudet

Keskimmäinen ero kaareutusmassa [mm / 1,2 m]	Suurin ero kaareutusmassa [mm / 1,2 m]	Pienin ero kaareutusmassa [mm / 1,2 m]	Keskimmäinen ero kulmavetäymässä [mm / 60 mm]	Suurin ero kulmavetäymässä [mm / 60 mm]	Pienin ero kulmavetäymässä [mm / 60 mm]
0,25	0,7	0	0,14	0,3	0

Tämän työn mittaus- ja simulaatiotuloksia tulkittaessa on hyvä tiedostaa, että sekä mitauksissa että itse hitsaamisen lähtötilanteissa voi esiintyä huomattaviakin virhelähteitä, jotka vaikuttavat merkittävästi mittaustuloksiin. Esimerkiksi levyihin polttoleikatessa jääneitä jäännösjännityksiä tai alkukaareutumia ei oteta huomioon laskentamalleissa ol- lenkaan.

Suurempien rakenteiden, kuten jäykistettyjen levykenttien muodonmuutoksia määrittä- essä jäännösvenymämenetelmä todetaan tutkimuksien perusteella varteenotettavaksi vaihtoehdoksi. Muiden venymäperusteisten yksinkertaistettujen menetelmien heikkou- tena on niissä suoritettava ylimääräinen integrointiaskel, joka heikentää mallien tark- kuutta. Työssä olisi voinut vertailla käytettyjä menetelmiä (erityisesti yksinkertaistettuja jäännösvenymäpohjaisia menetelmiä) ja niiden soveltuvuutta teollisuustarkoituksiin tar- kemminkin, mutta aikataulu- ja tallennustilapakotteet rajoittivat työssä itse toteutettavat simulaatiot TEPA -malleihin ja muita menetelmiä avattiin aiheesta jo tehtyjen tutkimus- ten avulla.

Tieteellisestä näkökulmasta hitsausmuodonmuutosten simuloinnissa on runsaasti jatko- kehitysmahdollisuuksia. Esimerkiksi monipalkkohitsauksen, tunkeuman, alkurakojen ja faasimuutosten mallintamisessa pystyttäisiin simulaatiota kehittämään huomattavasti. Li- säksi simuloinneissa voitaisiin ottaa huomioon esimerkiksi myös teräslevyjen polttoleik- kausprosessi, jonka rakenteeseen aiheuttamat jäännösjännitykset voitaisiin asettaa alkuti- laksi hitsaussimulaatioon. Näiden mallien avulla voitaisiin päästä käsiksi tarkemmin sii- hen, kuinka suuri vaikutus milläkin tekijällä on hitsausmuodonmuutoksiin. Teollisuustar- koituksiin jo luoduilla laskentamalleilla on riittävä tarkkuus muodonmuutosten määrittä- misessä.

Jatkotutkimusta voitaisiin tehdä myös jäännösvenymämenetelmän soveltamisesta isoihin rakenteisiin, kuten jäykistettyihin levykenttiin hyödyntäen TEPA-mallin pohjalta lasket- tuja plastisia venymiä ja venymäalueita. Teollisuuden näkökulmasta tämä on todennäköi- sesti mielenkiintoisempi vaihtoehto, kuin tarkemman simulaatiomallin viilaaminen ja eri- laisten ilmiöiden vaikutusten tarkempi määrittäminen hitsausmuodonmuutoksiin. Toinen mielenkiintoinen kehityssuunta on soveltaa optimointialgoritmeja hitsausprosessin para- metrien määrittämiseen, kuten lähteessä [35] tai esilämmityksen suuruuden modifioimi- seen kesken hitsaamisen riippuen hitsattavan rakenteen geometriamuutoksista [32]. Li- säksi esimerkiksi värähtelyn hyödyntäminen ja sen vaikutuksen simuloiminen hitsaus- muodonmuutosten hallitsemisessa ja jäännösjännitysten vähentämisessä on mielenkiin- toinen ja varmasti hyödyllinen tutkimuskohde sekä tieteellisestä että teollisesta näkökul- masta. [33]

LÄHTEET

- [1] Hitsaussanasto. Yleistermit. Suomen standardoimisliitto, SFS 3052, 1996, 122 s.
- [2] Z. Zeng, X. Wu, M. Yang, B. Peng, Welding distortion prediction in 5A06 aluminum alloy complex structure via inherent strain method, *Metals*, Volume 6, Issue 9, 2016, p. 214
- [3] A. K. Mondal, P. Biswas, S. Bag, Experimental and FE analysis of submerged arc weld induced residual stress and angular deformation of single and double sided fillet welded joint, *International Journal of Steel Structures*, Volume 17, 2017, pp. 9–18
- [4] A. Bachorski, M.J. Painter, A.J. Smailes, M.A. Wahab, Finite-element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 92–93, 1999, pp. 405–409
- [5] T. Björk, Hitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset ja jäännösännitykset (esitys), IWE / IWT 29 – Kansainvälinen hitsauskoordinoijan pätevyityskoulutus, Lappeenranta, 2015
- [6] T. Björk, P. Hautala, K. Huhtala, S. Kivioja, M. Kleimola, M. Lavi, H. Martikka, J. Miettinen, A. Ranta, J. Rinkinen, P. Salonen, *Koneenosien suunnittelu*, Sanoma Pro, 2014, 517 s.
- [7] K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, 1980, 642 p.
- [8] Z. Barsoum, A. Lundbäck, Simplified FE welding simulation of fillet welds – 3D effects on the formation residual stresses, *Engineering Failure Analysis*, Volume 16, 2009 pp. 2281–2289
- [9] W. Souder, P. Hidnert, Thermal Expansion of a few Steels, *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, Volume 17, 1922, pp. 611–626
- [10] H. Suzuki, *Up-to-date welding handbook*, Sankaido Publishing, 1972
- [11] K. Satoh, Y. Mukai, M. Toyoda, *Welding engineering*, Rikogakusha Publishing, 1979
- [12] Y. Ueda, H. Murakawa, N. Ma, *Welding Deformation and Residual Stress Prevention*, Butterworth-Heinemann, 2012, 289 p.
- [13] *Welding handbook*, 8th edition, Volume 1, American Welding Society, 1987

- [14] P. Michaleris, *Minimization of Welding Distortion and Buckling: Modelling and Implementation*, Woodhead Publishing, 2011, 308 p.
- [15] G. Jung, C.L. Tsai, *Plasticity-Based Distortion Analysis For Fillet Welded Thin Plate T-Joints*, dissertation, Ohio State University, 2003, 154 p.
- [16] T. Teng, C. Fung, P. Chang, W. Yang, Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 78, 2001, pp. 523–538
- [17] C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, Influences of mesh density and transformation behavior on the result quality of numerical calculation of welding induced distortion, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 19, 2011, pp. 1847–1859
- [18] A. A. Bhatti, Z. Barsoum, H. Murakawa, I. Barsoum, Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 229, 2016, pp. 216–229
- [19] S. Sreenivasa Prashanth, M.J. Jose, Finite element modelling of moving heat source and study of the effect of welding torch speed on residual stress, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Volume 4, Special Issue 12, 2015, pp. 46–50
- [20] Y. Rong, Y. Huang, G. Zhang, Y. Chang, X. Shao, Prediction of angular distortion in no gap butt joint using BPNN and inherent strain considering the actual bead geometry, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 86, 2016, pp. 59–69
- [21] D. Deng, H. Murakawa, W. Liang, Prediction of welding distortion in a curved plate structure by means of elastic finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 203, 2008, pp. 252–266
- [22] J. Lukkari, *Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus*, Opetushallitus, 2002, 290 s.
- [23] J. Lukkari, *Jauhekaarihitsaus – Yleisesitys (esitys)*, IWE / IWT 29 – Kansainvälinen hitsauskoordinoijan pätevyityskoulutus, 2014, Lappeenranta
- [24] J.K. Kristensen, D. Petring, S. Webster, Hybrid laser welding of thick section steels – the hyblas project, *International Conference on Advances in Welding Science & Technology for Construction*, International Institute of Welding, 2010, Istanbul, Turkey, pp. 507–515

- [25] J. Sun, X. Liu, Y. Tong, D. Deng, A comparative study on welding temperature fields, residual stress distributions and deformations induced by laser beam welding and CO₂ gas arc welding, *Materials and Design*, Volume 63, 2014, pp. 519–530
- [26] A. Unt, E. Lappalainen, A. Salminen, Comparison of welding processes in welding of fillet joints, *Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Anchorage, Alaska, 2013
- [27] A. Unt, I. Poutiainen, A. Salminen, Effect of sealing run welding with defocused laser beam on the quality of T-joint fillet weld, *Physics Procedia* 56, 2014, pp. 497–506
- [28] C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, The effect of tack welding on numerically calculated welding-induced distortion, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, 2012, pp. 308–314
- [29] H. Kaufmann, Efficient production of stiffeners for shipbuilding, *Svetsaren – The ESAB Welding and cutting journal*, Volume 58, Issue 1, 2003, pp. 9–15
- [30] T. Salmi, S. Pajunen, *Lujuusopin perusteet*, Pressus, 2010, 462 s.
- [31] G. Fu, M. Lourenço, M. Duan, S.F. Estefen, Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures, *Marine Structures*, Volume 46, 2016, pp. 30–55
- [32] J. Xu, W. Li, The nonlinear time-varying response of dynamic thermal tensioning for welding-induced distortion control, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 129, 2007, pp. 333–341
- [33] Y.P. Yang, Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 18, 2009, pp. 856–862
- [34] M. Watanabe, K. Satoh, H. Morii, I. Ichikawa, Distortion in web plate of welded built-up girders due to welding of stiffeners and methods for decreasing it, *Journal of the Japan Welding Society*, Volume 26, 1957, pp. 591–596
- [35] R. Sudhakaran, V. Vel Murugan, P.S. Siva Sakthivel, Optimization of process parameters to minimize angular distortion in gas tungsten arc welded stainless steel 202 grade plates using genetic algorithms, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Volume 2, 2010, pp. 731–748

- [36] Z. Barsoum, M. Ghanadi, S. Balawi, Managing welding induced distortion – comparison of different computational approaches, *Procedia Engineering*, Volume 114, 2015, pp. 70–77
- [37] J. Wang, N. Ma, H. Murakawa, An efficient FE computation for predicting welding induced buckling in production of ship panel structure, *Marine Structures*, Volume 41, 2015, pp. 20–52
- [38] ANSYS Workbench 19.0 Manual, ANSYS Inc., web page. Available (accessed 21.1.2019): https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v190/wb_sim/ds_Home.html
- [39] J. Outinen, Mechanical properties of structural steels at high temperatures and after cooling down, Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications, Volume 32, 2007, 37 p.
- [40] Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 3: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Suomen standardoimisliitto, SFS EN 12952-3, 2001, 286 s.
- [41] W. Skowroński, A. Włoka, R. Chmiel, Modelling of strength processes of S235JR steel at increased temperature, *Structure and Environment*, Volume 6, 2014, pp. 32–37
- [42] A. F. Mills, Basic heat & mass transfer, 2nd edition, Prentice Hall, 1999, 1000 p.
- [43] M. Garifullin, B. Launert, M. Heinisuo, H. Pasternak, K. Mela, S. Pajunen, Effect of welding residual stresses on local behavior of rectangular hollow section joints. Part 1 - Development of numerical model, *Bauingenieur*, Volume 93, 2018, pp. 152–159
- [44] M. Peric, Z. Tonkovic, A. Rodic, M. Surjak, I. Garašic, I. Boras, S. Švaic, Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld, *Materials and Design*, Volume 53, 2014, pp. 1052–1063
- [45] C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, Effect of heat source configuration on the result quality of numerical calculation of welding-induced distortion, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 20, 2012, pp. 112–123
- [46] D. Deng, Y. Luo, H. Serizawa, M. Shibahara, H. Murakawa, Numerical simulation of residual stress and deformation considering phase transformation effect, *Transactions of the Japan Welding Research Institute*, Volume 32, 2003, pp. 325–333
- [47] M. Ghanadi, Z. Barsoum, Managing distortion in welded structures using FEM, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, 2013, 35 p.

- [48] X. Pei, S. Song, P. Dong, An analytical method for estimating welding-induced plastic zone size for residual stress profile development, ASME, Pressure Vessels and Piping Conference, 2015, Boston, USA, 11 p.
- [49] S. Song, X. Pei, P. Dong, An analytical interpretation of welding linear heat input for 2D residual stress models, ASME, Pressure Vessels and Piping Conference, 2015, Boston, USA, 9 p.
- [50] A. Mendizabal, J.B. González-Díaz, M. San Sebastián, A. Echeverría, Improved accuracy of the inherent shrinkage method for fast and more reliable welding distortion calculations, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 25, 2016, pp. 2670–2678
- [51] M. Kim, M. Kang, H. Chung, Simplified welding distortion analysis for fillet welding using composite shell elements, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, 2015, pp. 452–465
- [52] M. Sulaiman, Y. Manurung, E. Haruman, M. Rahim, M. Redza, R. Lidam, S. Abas, G. Tham, C. Chau, Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using weld planner, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Volume 25, 2011, pp. 2641–2646
- [53] L. Zhang, P. Michaleris, P. Marugabandhu, Evaluation of applied plastic strain methods for welding distortion prediction, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 129, 2007, pp. 1000–1010
- [54] K. Wärmefjord, R. Söderberg, M. Ericsson, A. Appelgren, A. Lundbäck, J. Lööf, L. Lindkvist, H. Svensson, Welding of non-nominal geometries – physical tests, *Procedia CIRP*, Volume 43, 2016, pp. 136–141
- [55] Z. Barsoum, A. Bhatti, S. Balawi, Computational Weld Mechanics – Towards a simplified and cost effective approach for large welded structures, *Procedia Engineering*, Volume 114, 2015, pp. 62–69