

Verna Vanhatalo

# VÄSYMINEN HITSATUISSA RAKEN- TEISSA

Teknillisten tieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Kesäkuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Verna Vanhatalo: Väsyminen hitsatuissa rakenteissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Kesäkuu 2019

---

Rakenteiden väsyminen on laajasti tutkittu asia, koska isoon osaan rakenteista kohdistuu dynaamista kuormitusta rakenteen eliniän aikana. Tämä dynaaminen kuormitus vähentää rakenteen elinikää huomattavasti verrattuna staattisen rasituksen alla olevaan rakenteeseen. Rakenteiden hitsaus myös muuttaa perusmateriaalin ominaisuuksia ja aiheuttaa materiaalin rakenteeseen epäkohtia. Tämän seurauksena rakenteeseen ilmestyy jännityksiä, jotka voivat edesauttaa rakenteen hajoamista. Väsymisikää voidaan kuitenkin vaikuttaa hyvällä suunnittelulla sekä viimeistelyllä.

Kandidaatintyössä tutkittiin hitsauksen vaikutusta rakenteiden väsymisikään sekä mitkä tapahtumat johtavat rakenteen lyhyeen elinikään. Työssä pyrittiin selvittämään miten hitsatuista rakenteista saisi mahdollisimman pitkäikäisiä väsyttävän kuormituksen alla. Näitä teemoja selvitettiin ensin olemassa olevista tieteellisistä kirjoituksista, artikkeleista sekä julkaistuista tutkimuksista. Saadun tiedon perusteella lähdettiin simuloimaan kolmea erilaista liitosta Ansys Workenich ohjelmalla. Kahta hitsattua liitosta verrattiin yhteen kiinteään kappaleeseen ja näitä rakenteita rasitettiin identtisillä voimilla.

Simuloinnin tuloksien perusteella voitiin päätellä, että yhdestä kiinteästä kappaleesta tehty rakenne kestää huomattavasti paremmin rasitusta mitä hitsattu rakenne. Rasituksen madaltaminen pidensi väsymisikää myös huomattavasti. Hitsattuja rakenteita tehdessä pitäisikin välttää turhien hitsattujen liitosten tekemistä. Jos kuitenkin näitä liitoksia tehdään pitää niiden paikat suunnitella siten, että hitsiin kohdistuu mahdollisimman vähän rasitusta ja että hitsit tehdään laadukkaasti oikein mitoittaen.

Avainsanat: väsyminen, hitsiliitos, väsymisikä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Verna Vanhatalo: Fatigue in Welded Structures  
Bachelor's thesis  
Tampere University  
Mechanical Engineering  
June 2019

---

Fatigue of structures is widely studied field because majority of structures are affected with dynamic stress in its lifetime. This dynamic stress lowers the lifespan of the structure significantly compared to a structure under static stress. Welding also changes the properties of the base material and causes defects. That is why stress fields occur in the structure which helps the structure to fail. Fatigue life can be affected with good design and finishing.

In this bachelor's thesis the effects of welding to the fatigue life and which events cause the short life span of structures was studied. The aim was to find out how to make welded structures as long-lasting as possible under dynamic stress. These themes were first studied from existing literature, articles and scientific publications. Based on the information obtained was simulations made on three different joints with Ansys Workbench. Two of the welded joints was compared to one solid structure and these structures were under identical strain.

Based on the simulation it was possible to conclude that a structure made from one solid piece will last under strain a lot longer than welded structure. Also lowering the strain, the structure will last a lot longer. When making welded structures unnecessary joints should be avoided. If welding is mandatory the placements of the joints should be designed so that appearing strains are as low as possible and welds should be high quality.

Keywords: fatigue, welded structure, fatigue life

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. VÄSYMINEN .....	2
2.1 Väsyminen ilmiönä .....	2
2.2 Väsymislaskenta .....	3
2.2.1 Perinteinen väsymislaskenta .....	3
2.2.2 Myötöväsymislaskenta .....	5
2.3 Väsymiskestävyyteen vaikuttavat asiat .....	6
3. HITSILIITOSTEN VÄSYMINEN .....	8
3.1 Hitsaus ja sen vaikutus väsymiseen .....	8
3.2 Eri hitsiliitokset .....	9
3.3 Hitsiliitoksen rakenne ja mitoitus .....	9
3.4 Hitsiliitoksen väsymiseen vaikuttavat tekijät .....	10
3.5 Hitsiliitosten väsymisiän selvitys .....	12
3.5.1 Nimellisjännitysmenetelmä .....	12
3.5.2 Hotspot menetelmä .....	13
3.5.3 Lovijännitysmenetelmä .....	14
3.5.4 Murtumismekaniikkamenetelmä .....	15
4. VÄSYMISIÄN SELVITYS .....	16
4.1 Ohjelman käyttämä laskentametodi .....	16
4.2 Analyysin kulku .....	16
4.3 Palkkien väsymisiät .....	17
4.4 Vertailu kiinteään kappaleeseen .....	18
5. TULOSTEN TARKASTELU .....	20
6. YHTEENVETO .....	21

# 1. JOHDANTO

Väsymisellä tarkoitetaan ilmiötä, kun rakenteeseen kohdistuu muuttuvaa, eli dynaamista värähtelyä sen käyttöön aikana (Vähäkainu, s. 15). Tämän seurauksena rakenteisiin alkaa ilmestymään mikroskooppisia säröjä. Rasituksen jatkuessa nämä mikroskooppiset säröt alkavat kumuloitua ja lopuksi särö on niin iso, että kappale murtuu vaurion kohdalta kokonaan. (Pajunen & Salmi 2010, s. 355)

Väsymisilmiön tutkimista on aloitettu varsinaisesti 1850-luvulla, kun alettiin selvittämään junavaunujen sekä veturien osien murtumisesta aiheutuneita onnettomuuksia. Tutkimuksia tehtiin dynaamisen kuormituksen alla ja huomattiin, että jotkin rakenteet kestivät tiettyä dynaamista kuormitusta käytännössä loputtomiin, kun taas toisella kuormituksella rakenteet saivat nopeasti selviä vaurioita. Näiden tutkimusten perusteella löydettiin väsymisrajan ja jännitysvaihtelun yhteys materiaalin murtumiseen. Tästä tutkimuksesta alkoi väsymisen laajempi selvitys. Suurin osa väsymiseen liitetyistä kaavoista sekä teorioista on saatukin kokeellisin menetelmin, koska materiaalin väsymisen kestävyyttä on ollut vaikea suunnitella teoreettisella mallintamisella. (Pajunen & Salmi 2010, s. 354-355)

Suurin osa koneiden ja rakenteiden vaurioista on juuri väsymisen ansioista ja varsinkin näiden hitsaamalla tehdyt liitokset ovat alttiita murtumiselle, materiaalin muokkautumisen ansiosta (Pajunen & Salmi 2010, s. 353). Tämän kandidaatintyön tavoitteena on hahmottaa, miten hitsaaminen vaikuttaa rakenteen väsymisenkestoon ja miten hitsirakenteista saadaan mahdollisimman kestäviä.

Ensimmäiseksi työssä perehdytään väsymiseen teorian ja sen tutkimusmenetelmiin. Tämän jälkeen käydään läpi erilaisia hitsiliitoksia sekä näiden mitoitus- ja erilaisia metodeja, millä tavalla saadaan hitsiliitoksen väsymisikä selville. Lopuksi simuloidaan Ansys Workbench -ohjelmalla erilaisia hitsattuja rakenteita dynaamisen kuormituksen alla ja verrataan saatuja väsymisiä arvoja kiinteän kappaleen väsymisikään.

## 2. VÄSYMINEN

### 2.1 Väsyminen ilmiönä

Kun rakenteeseen kohdistetaan muuttuvaa eli dynaamista rasiitusta, sen rakenteeseen alkaa ilmestyä mikroskooppisia vaurioita. Kun tätä dynaamista rasiitusta jatketaan rakenteeseen ilmentynyt vaurio alkaa kumuloitua silmännähtäväksi säröksi. Kyseinen särö jatkaa kasvamista, kunnes rakenne murtuu kokonaan. Tätä ilmiötä kutsutaan väsymiseksi. Väsymisvaurio on aina seuraus toistuvasta plastisesta muodonmuutoksesta, eli rakenne ei enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa vaan rakenteeseen on tullut palautumatonta muodonmuutosta. (Pajunen & Salmi 2010, s. 355) Väsymisen tapauksessa kappaleen pituus voi esimerkiksi muuttua, kun rakenteeseen kohdistuu vetävää rasiitusta.

Väsymisvaurion muodostumisessa on huomattavissa kolme eri vaihetta. Pajunen ja Salmen (2010, s. 355) muukaan dynaamisen kuormituksen alussa materiaaliin ilmestyvät vaurioita mikroskooppisen materiaaliivian ympärille. Jos tämä kuormitus jatkuu, vauriot yhdistyvät makroskooppiseksi alkusäröksi. Alkusärö on nähtävissä paljain silmin ja sen suuruusluokkana pidetään noin 0,1 mm säröä. Lopuksi, kun kuormituksen annetaan jatkua, alkusärö pitenee ja ulottuu koko rakenteen läpi, jolloin kappale murtuu. (Pajunen & Salmi 2010, s. 355) Kun alkusärö on muodostunut, eli vaurion pituus on 1,0 mm, niin särön koko kasvaa yleensä eksponentiaalisesti kuormitus syklien jatkuessa. Tämän nopean kasvun takia väsyminen on hyvinkin vaarallista, jos säröä ei huomata ajoissa (Forrest 1962, s. 1)

Kun rakenne on murtunut väsymisen takia, voidaan murtuman poikkipinnasta havaita selvästi kolme erilaista aluetta. Kohta, mistä särö on saanut alkunsa, ja sen ympäristö on sileää ja simpukankuorimaista. Tässä kohtaa väsyminen on ollut hidasta. Sileän alueen jälkeen voidaan havaita hieman karheampaa aluetta ja tässä särö on päässyt eteneämään jo nopeammin. Poikkipinta-alan kolmannessa alueessa on huomattavissa se kohta, missä rakenne on antanut periksi ja murtunut kokonaan. (Forrest 1962, s. 3)

Rakenteen väsymiseen vaikuttavat monet eri tekijät, muun muassa kimmo- ja plastisuus-teoriat sekä materiaaliopin lait (Pajunen & Salmi 2010, s. 355). Rakenteen materiaaliivallinnalla sekä esimerkiksi pinnanlaadun hyvällä varmistamisella voidaan vaikuttaa paljon siihen, kuinka kauan rakenne pystyy vastustamaan näitä muodonmuutoksia.

Santaoja (2017, s. 467) huomauttaa, kuinka tärkeää on ottaa väsyminen huomioon rakenteita suunniteltaessa, koska rakenne voi murtua, vaikka jännitystila olisi myötörajan alapuolella. Oikeanlaisella väsymismitoituksella voitaisiin estää monet rakenne- sekä korneikat, joista yli puolet on juuri väsymisestä johtuvaa. Tämän takia väsymismitoitukselle on asetettu määräyksiä, jotta pystyttäisiin estämään suuronnettomuuksia kuten siltojen romahtamisia. (Pajunen & Salmi 2010) Väsyminen ei ole pelkästään metallisten materiaalien ongelma, vaan väsymistä voidaan havaita kaikissa materiaaleissa (Anderson 2017, s.471), jopa ihmisen luissa (Forrest 1962, s. 2).

## **2.2 Väsymislaskenta**

Väsymislaskennalla pyritään selvittämään kuinka pitkään rakenne kestää dynaamista kuormitusta. Tätä aikaa kutsutaan kappaleen eliniäksi ja merkitään kirjaimella N. Elinikä kertoo kuinka monta kuorman vaihdosta, sykliä, rakenne kestää ennen kuin se murtuu kokonaan. (Pajunen & Salmi 2010, s. 355-356)

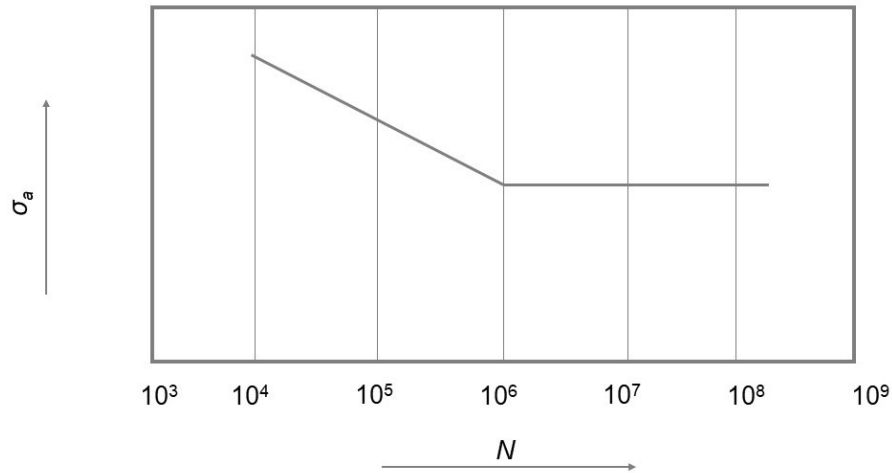
Väsymislaskenta voidaan jakaa kahteen eri tapaan riippuen materiaalin eliniästä. Jos materiaalin elinikä on kymmenestä tuhannesta syklistä satoihin tuhansiin sykleihin, puhutaan perinteisestä väsymislaskennasta. Toisaalta, jos materiaalin elinikä on huomattavasti pienempi, muutamasta syklistä kymmeneentuhanteen sykliin puhutaan myötöväsymislaskennasta. (Pajunen & Salmi 2010, s. 355) Vaikka laskentatavoilla on selkeä ero eliniöissä, Pajunen ja Salmen (2010, s. 355) mukaan ei ole olemassa selkeää rajaa, milloin pitäisi siirtyä perinteisestä väsymislaskennasta myötöväsymislaskentaan.

### **2.2.1 Perinteinen väsymislaskenta**

Väsymislaskennan avulla pystytään ennustamaan kuinka suuri syklien määrä aiheuttaa täysin ehjään kappaleeseen lopullisen murtumisen tietyllä rasituksella. Jos rakenne murtuu lopullisesti, kun sitä on rasitettu kymmenestä tuhannesta syklistä satoihin miljooniin sykleihin asti, voidaan kappaleen elinikää laskea perinteisellä väsymislaskennalla eli jännitysmenetelmällä. Tällöin materiaalin plastinen alue ei ole suuri, eikä sitä oteta laskennassa huomioon. (Pajunen & Salmi 2010, s. 355)

Jännitysmenetelmä perustuu myös täysin kokeellisesti saatuihin tuloksiin. Yksi tärkeimmistä koemenetelmistä on R. Moore -testi, jossa täysin ehjää koesauvaa rasitetaan taiputuksella. Testin tuloksista saadaan tehtyä niin sanottu Wöhlerin käyrä, mistä selviää materiaalin elinikä tietyillä jännityksillä. (Pajunen & Salmi 2010, s. 359) Wöhler käyrä

tunnetaan myös jännitys-elinikäkäyränä ja sillä havainnollistetaan jännityksen muutoksen vaikutusta logaritmiseen elinikään, jännityssuhteen ollessa vakio (Bathias, 2013). Kuvassa 1 näkyy esimerkki jännitys-elinikäkäyrästä.

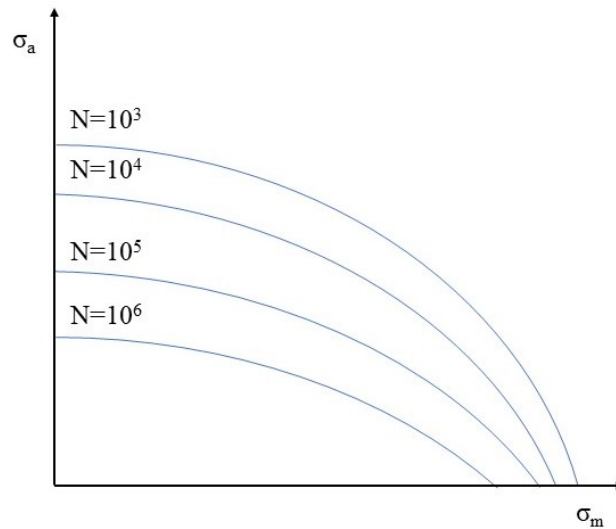


**Kuva 1.** Wöhlerin käyrä (mukailten Pajunen & Salmi 2010, s. 360).

Voidaan huomata, että jännityksen madaltuessa tulee vastaan piste, missä jännityksen lasku ei enää vaikuta elinikään, vaan kappaleella on teoreettisesti loputon elinikä. Tälle eliniälle on annettu teoreettinen syklien määrä, noin  $10^6$ , jos kappale ei ole pettänyt tähän mennessä voidaan sanoa, että tällöin kappaleella on loputon elinikä (Bathias, 2013).

Väsymislujuuspiirroksen avulla ennustetaan kappaleen väsymisikää tietyillä jännitys-amplitudin sekä keskijännityksen yhdistelmillä. Kyseiset kuvaajat on saatu täysin koekallisesti. Haighin vakioelinikäkäyrässä esitetään vakioelinikiä tietyillä jännityksillä. Kyseistä käyrää yksinkertaistetaan usein erilaisilla lineaarisilla sekä toisen asteen malleilla. Suosituin väsymislujuuspiirros on Goodmanin piirros. (Pajunen & Salmi 2010, s. 362) Kuvassa 2 on hahmotettu Haighin vakioelinikäkäyrät, missä pystysuuntaisella akselilla on koeksuvaan kohdistetun muuttuvan jännityksen amplitudi ja vaakasuuntaisella akselilla on tämän jännityksen keskiarvo.





**Kuva 2.** Haighin vakioelinkäyrät (mukaillen Pajunen & Salmi 2010, s. 362).

Kuvasta voidaan siis huomata, että kappale kestää rasitusta äärettömän kauan, jos jännityksen amplitudin ja keski­jännityksen kuormitusyhdistelmät ovat valitun käyrän alapuolella.

## 2.2.2 Myötö­väsymislaskenta

Myötö­väsymislaskennassa eli venymämenetelmässä materiaalin plastinen alue on paljon suurempi ja kuormitustasot ovat korkeammalla (Pajunen & Salmi 2010, s. 355). Tällöin jokaisella syklillä rakenteeseen syntyy kumuloituvaa, pysyvää, venymää, koska rakenteeseen kohdistuva jännitys ylittää toistuvasti myötörajan (Santaoja 2017, s. 467). Tämän takia pystytään tutkimaan minkälaisen makroskooppisen alkusärön syklien lukumäärä, saa aikaiseksi aluksi täysin ehjään kappaleeseen (Pajunen & Salmi 2010, s. 355).

Myötö­väsymislaskennalla voidaan saada selville, miten materiaali käyttäytyy syklien määrän kasvaessa. Kun kappaletta rasitetaan jatkuvasti yli myötörajan, saadaan jännitys-venymäkuvaajasta hystereesisilmukkaa esittävä kuvaaja. Kun pysytään matalilla jännitystasoilla kuvaajan käyrä on lineaarinen, mutta muuttuu epälineaariseksi jännityksen kasvaessa. Epälineaarisisessa kohdassa venymä kasvaa huomattavasti. Kuormituksen jatkuessa, hystereesisilmukka muuttuu riippuen siitä, lujittuuko vai pehmenee­kö materiaali syklien edetessä. Lopuksi silmukka stabiloituu. (Pajunen & Salmi 2010, s. 382-383)

Venymä-elinikäkäyrällä hahmotellaan väsymiskokeen aikana kappaleen kimmoisen ja plastisen venymän osuus. Käyrältä nähdään, että jos kappaleen elinikä on suuri, on

myös sen kimmoisen venymisen osuus isompi. (Pajunen & Salmi 2010, s. 386-387) Tällöin elinikää pitkittää kimmainen venymä, mikä palautuu aina alkupituuteen eikä aiheuta materiaaliin suuria vikoja. Kun taas eliniän ollessa pieni myös plastisen venymän osuus on suurempi (Pajunen & Salmi 2010, s. 387) ja materiaaliin ilmestyvät lopulliset muodonmuutokset kumuloituvat ja pitkittävät rakennetta.

### **2.3 Väsymiskestävyyteen vaikuttavat asiat**

Väsymisikään liittyvät testit tehdään usein ideaalitulanteissa, missä esimerkiksi koekappaleen pinta on täysin sileä ja jännitysamplitudit pysyvät vakioina. Todellisuudessa ei näin kuitenkaan ole ja olosuhteet voivat muuttaa rakenteen elinikää huomattavasti. Näissä tilanteissa otetaan huomioon redusointiparametrit, jotka antavat tarkempaa kuvaa materiaalin kestävydestä. Kun rakenteeseen vaikuttava vaihtolujuus kerrotaan redusointiparametrillä, saadaan redusoitu vaihtolujuus. (Pajunen & Salmi 2010, s. 367) Redusoitu vaihtolujuus kertoo siis, kuinka paljon esimerkiksi kappaleen pinnanlaatu vaikuttaa väsymisenkestoon.

Rakenteen koon muutos ei suuresti vaikuta sen väsymiskestävyyteen, koska taivutuksesta ja väännöstä aiheutuvat reunajännitykset ovat yhtä suuria niin isossa kuin pienessä kappaleessa. Kuormituksen ollessa akselin suuntaista, jännityskenttä on melkein tasainen ja tällöin poikkipinta-alan suuruus ei vaikuta väsymiskestävyyteen. Kuitenkin rakenteen suuri koko voi vaikuttaa hieman väsymiskestävyyttä alentavasti, koska suuremmalla poikkipinta-alalla on suurempi mahdollisuus saada mikroskooppisia materiaalivikoja. (Pajunen & Salmi 2010, s. 367)

Kuormitustyyppi vaikuttaa myös rakenteen väsymiskestävyyteen. Jos rakenteeseen aiheutetaan aksiaalista vetorasitusta, kappaleeseen vaikuttava jännityskenttä on tasaisesti jakautunut koko poikkipinta-alalle. Taivutuksessa taas jännityskenttä on lineaarinen ja tällöin rakenteen pintaan aiheutuu suurempi jännitys mitä keskiakselille. (Pajunen & Salmi 2010, s. 368) Taivutuksen alaisena oleva rakenne on siis alttiimpi väsymiselle kuin puhtaan vetorasituksen alainen jännityksen jakautumisen takia.

Pinnanlaadulla on suuri merkitys väsymiskestävyyteen. Epätasaisuudesta johtuvat kuromat auttavat alkusäröjen synnyssä. Pinnan laatuun vaikuttaa paljon rakenteen viimeistelyyn käytetty työstämistapa. Esimerkiksi kiillotus sekä hionta parantavat väsymiskestävyyttä huomattavasti enemmän kuin kuumavalssaus sekä taonta (Pajunen & Salmi 2010, s. 369). Joidenkin tutkimusten mukaan on huomattu, että esimerkiksi kuumakä-

sittely parantaa väsymisenkestoa kaksi kertaa paremmin mitä käsittelemätön materiaali (Ashcroft et al. 2016).

Pintakäsittely taas saa rakenteen pintaan aikaan jännityskentän, mikä estää materiaali-  
viivojen syntyminen. Jos pintaan on pintakäsittelyn jälkeen syntynyt puristava jäännös-  
jännitys, väsymisenkesto paranee. Toisaalta, jos pinnan jäännösjännitys on vetävä, se  
heikentää pinnan väsymisenkestoa. (Pajunen & Salmi 2010, s. 370). Esimerkiksi metalli-  
sen pinnan taonta sekä käsittely volframkarbidi-pinnoitteella on huomattu parantavan  
materiaalin kykyä vastustaa väsymisen merkkejä (Kanchidurai, 2017).

Rakenteiden erilaiset muodot, esimerkiksi reiät ja ulokkeet, aiheuttavat jännityskeskitty-  
miä niiden ympärille. Nämä jännityskeskittymät aiheuttavat suuren osan väsymisvauri-  
oista. Jännityskeskittymien vaikutuksen kokonaisjännitykseen saadaan selville loven-  
muotoluvulla. (Pajunen & Salmi 2010, s. 374) Näiden jännityskeskittymien väsymisen-  
kestoa voidaan selvittää venymämenetelmiä käyttäen (Pajunen & Salmi 2010, s. 391).

## 3. HITSILIITOSTEN VÄSYMINEN

### 3.1 Hitsaus ja sen vaikutus väsymiseen

Jotta rakenteita voitaisiin liittää yhteen hitsaamalla, tarvitaan lämpöä sekä mahdollista väliainetta (Marrs 2011). Hitsauksessa käytettävän lämpötilan vaikutuksesta, hitsattavien rakenteiden liitoskohdan materiaaleihin ilmestyy erilaisia mikrorakenteita. Nämä mikrorakenteet eroavat toisistaan, riippuen siitä millainen vaikutus lämmöllä on kyseisessä kohtaa ollut. Erilaisten mikrorakenteiden vuoksi hitsauksen jälkeen näillä materiaalueilla on myös erilaisia ominaisuuksia. (Vähäkainu s. 15-16)

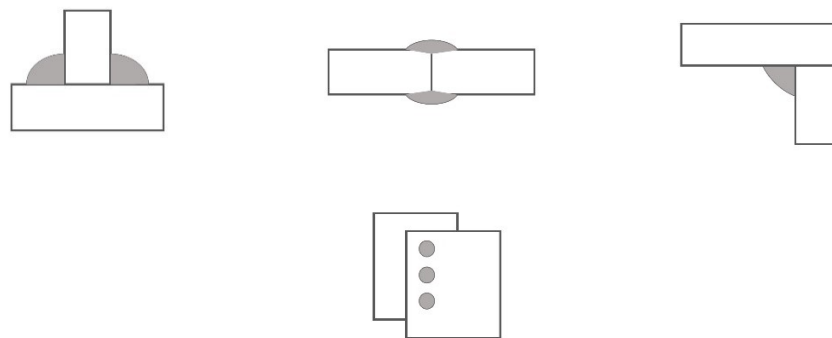
Eri mikrorakenteiden lisäksi hitsirakenteen viilentyessä sauman ympärille ilmestyy erilaisia jännitystiloja, mitkä vaikuttavat suuresti hitsatun rakenteen laatuun. Tämän takia huonosti valittu hitsin väliaine tai epätarkasti tehty hitsiliitos on erittäin altis väsymiselle sekä murtumiselle. Jos rakenteeseen kohdistuu paljon dynaamista kuormitusta, onkin tärkeä miettiä, olisiko järkevää valmistaa kyseinen rakenne esimerkiksi materiaalia poistavin menetelmin, kuten sorvaamalla. (Marrs 2011) Kun rakenteeseen kohdistuu vain staattista rasitusta ei haittaa, vaikka hitsiliitoksessa olisi huokoisuutta tai poimutusta. Nämä epäpuhtaudet eivät vaikuta rakenteen elinikään yhtä paljon kuin dynaamisen kuormituksen alla. Jos rakenteeseen kohdistuu vain staattista kuormitusta, onkin syytä huomioida vain hitsiliitoksen venyvyys sekä hitsisauman paksuus. (Dobmann et al. 2016)

Hyvin valittu väliaine ja oikein tehty hitsaus vaikuttavat huomattavasti rakenteiden kestävyYTEEN. Jos esimerkiksi hitsisauma pääsee reagoimaan hitsattaessa ilman hapen kanssa, sen väsymisen sieto lyhenee huomattavasti. Hitsisaumat kannattaakin sijoittaa paikkoihin missä ei esiinny rasituksia. (Marrs 2011) Ideaalilanteessa yhdistettäisiin esimerkiksi hitsausta ja materiaalia poistavia menetelmiä rakenteita suunniteltaessa. Marrs (2011) selostaa, että hitsatessa hitsisauman ympärillä hitsattavien rakenteiden sekä hitsisauman materiaali muuttuu, minkä takia nämä epäpuhtaat alueet ovat kaikista alttiimpia vaurioille.

Hitsatut alueet voidaan pinnoittaa, jotta väsymisensieto pitkittyisi. Tämä pinnoitus estää hitsiliitoksen hapettumisen ja näin pidentää rakenteen elinikää. Pinnoitukseen voidaan käyttää esimerkiksi maalia tai kemiallista nikkelpinnoitetta. (Marrs 2011)

### 3.2 Eri hitsiliitokset

Hitsiliitoksia on mahdollista koota muutamalla eri tyyllillä. Marrs (2011) esittää viisi erilaista hitsisaumaa ja kolme erilaista hitsiä. Kaksi eri kappaletta voidaan hitsata yhteen puskuliitoksella, T-liitoksella, kulmaliitoksella, reunaliitoksella tai limiliitoksella. Itse hitsisaumoja voidaan tehdä railohitsillä, tulppahitsillä tai pienahitsillä. Useimmin käytettyihin hitsiliitoksiin kuuluu railohitsillä yhdistetty puskuliitos sekä T- ja kulmaliitos yhdistettynä railo- tai pienahitsillä. Kuvassa 3 on esitelty ylhäällä vasemmalta oikealle T-liitos pienahitsillä, puskuliitos railohitsillä sekä kulmaliitos pienahitsillä ja alhaalla on esitetty tulppahitsattu kaksi levyä yhteen.

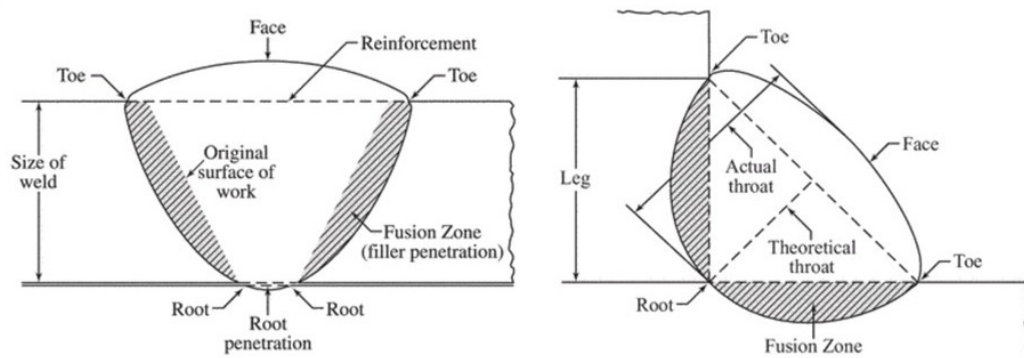


*Kuva 3. Erilaisia hitsiliitoksia.*

Eri hitsiliitosten välillä on havaittu eroavaisuuksia väsymisikää selvitettäessä. Hyvällä, käsittelemättömällä puskuliitoksella väsymislujuus on todettu olevan noin kaksi kolmasosaa kiinteän rakenteen väsymislujuudesta. Puskuliitoksen hitsaustavalla ei ole todettu olevan merkitystä hitsatun rakenteen väsymislujuuteen. Hitsiliitoksen muodolla sekä laadulla on taas huomattu olevan suuri merkitys hitsisauman kestävyteen. Pienahitsillä on todettu olevan matalampi väsymislujuus, mitä puskuliitoksella, koska pienahitsi aiheuttaa rakenteen perusaineen ja hitsisauman liitoskohtaan suuremman jännityskeskittymän. (Forrest 1962, s. 280-281, 287)

### 3.3 Hitsiliitoksen rakenne ja mitoitus

Hitsauksen jälkeen, hitsin läheisyydestä voidaan erottaa alueita mitä hitsauksesta johtuva lämpö on saanut aikaiseksi. Nämä alueet ovat kaikista alttiimpia vaurioille. (Marrs 2011) Kuvassa 4 on esitetty pienahitsin eri osa.



**Kuva 4. Railo- ja pienahitsin rakenne (Marrs 2011).**

Kuvasta voidaan erottaa sulamisvyöhyke (*Fusion Zone*) missä hitsimateriaali sekä perusrakenteen materiaali on sulautunut osittain yhteen. Sulamisvyöhykkeen jälkeen tulee lämpötilan muokkaama muutosvyöhyke (*Heat Affected Zone*), missä perusrakenteen materiaalin rakenne on muokkautunut lämpötilan vaikutuksesta. Muutosvyöhykkeen voidaan jakaa taas kolmeen osaan riippuen siitä, miten lämpötilan lasku on vaikuttanut materiaalin raekokoon. Esimerkiksi terästä hitsattaessa muutosvyöhykkeeseen kohdistuva lämpötila on noin 700-1500°C:ta ja mitä kuumemman lämpötilan rakenne on kokenut, sitä suurempi on materiaalin raekoko. Muutosvyöhykkeen jälkeen tulee lämpövyöhyke missä lämpötila on työlämpötilaa korkeampi, mutta vyöhykkeen mikrorakenteessa ei ilmene suuria muutoksia perusmateriaaliin. (Vähäkainu s.15-16) Muita kuvassa 2 esiteltyjä hitsin rakenteen osia on juuri (*root*), rajaviiva (*toe*), pinta (*face*), kyljen pituus (*leg*) ja leikkaus (*throat*).

Marssin (2011) mukaan pienahitsiä mitoittaessa pienahitsin kyljen leveydelle on suositeltu  $\frac{3}{4}$  pituutta suhteessa ohuimman levyn paksuuteen. Näin saadaan täysi lujuus hitsattuun rakenteeseen. Toisaalta Blodgett (1963) huomauttaa, että jos hitsatusta rakenteesta halutaan mahdollisimman jäykkä niin pienahitsin kyljen paksuuden pitäisi olla vähintään  $\frac{1}{4}$  ohuimman levyn paksuudesta ja enintään  $\frac{3}{8}$  ohuimman levyn paksuudesta. Jos rakenne hitsataan pelkästään toiselta puolelta, kyljen pituus pitäisi silloin olla kaksinkertainen.

### 3.4 Hitsiliitoksen väsymiseen vaikuttavat tekijät

Toisin kuin staattisen kuormituksen alaisuudessa, dynaamisen kuormituksen alla olevaan hitsiliitokseen vaikuttaa joustavuuden sekä hitsisauman paksuuden lisäksi monet muut tekijät. Dobmann et al. (2016) mukaan näiden lisäksi väsymisikään liittyy seitsemän muuta tekijää. Näitä ovat hitsin tunkeuma, kylmäpoimun koko, sisäisen fuusion puute,

hitsin rajaviivan säde, reunahaavan koko, hitsattujen kappaleiden sovituservirheet sekä huokoisuus. Hitsisauman kulmalla voi olla myös hieman tekemistä väsymisiin kanssa, mutta jos valittu hitsisauman materiaali on vahvaa, kulmalla ei ole enää niin suurta merkitystä. (Dobmann et al. 2016) Fricke et al. (2006, s. 9) painottaa myös näiden hitsin virheiden merkityksellisyyttä väsymisikään.

Hitsiliitoksen laatu sekä kestävyys määräytyy valtaosin sen valmistuksen aikana, varsinkin, jos ainoa hitsisauman kestävyteen vaikuttava tekijä on hitsin rajaviiva. Hitsisauman hyvällä suunnittelulla voidaan myös varmistaa hyvä kestävyys. Esimerkiksi hitsisaumaan vaikuttavia jännityksiä laskettaessa, on hyvä huomioida, että määritelmät tehdään ideaalitalanteissa. Todellisuudessa esimerkiksi hitsattu kulma voi vääristyä. Tällaisia epäkohtia voidaan arvioida jännityksen vahvistustekijällä km. Suunnittelijan on aina dokumentoitava sallittavat sovituservirheet. Jos sallittuja rajoja ei ole esitetty, hitsauksessa täytyy käyttää International Institute of Welding (IIW) määrittämiä arvoja. (Dobmann et al. 2016)

Hitsauksessa on myös huomioitava hitsisauman ympärille muodostuvat jäännösjännitykset. Kun hitsatessa käytettävä lämpö kohdistetaan rakenteen perusaineeseen, rakenne kokee lämpölaajenemista. Tätä laajenemista rajoittaa ympäröivä kylmempi perusaine. Lämmin hitsialue on plastisesti lämpöpuristettu ja viilenemisen jälkeen hitsisauman ympärille ilmestyy vetävää jäännösjännitystä. (Radaj 1992, s. 8) Nämä vetävät jäännösjännitykset pyrkivät avaamaan materiaalissa olevia väsymyksen aiheuttamia säröjä. Näin materiaalin epäkohtien kasvu nopeutuu ja väsymisikä pienenee.

Väsymisen kestoon vaikuttaa paljon myös materiaalivalinnat. Marssin (2011) mukaan hyvin valittu hitsimateriaali voi olla teoreettisesti yhtä vahva mitä rakenteen perusaine, mutta hitsaus vaikuttaa aina negatiivisesti hitsatun rakenteen väsymisenkestoon sekä iskunkestävyyteen.

Kuten kiinteän kappaleen väsymisenkestävyyttä, myös hitsattujen rakenteiden väsymisenkestävyyttä voidaan parantaa monilla eri tavoilla. Hyvällä suunnittelulla voidaan pitkitää rakenteen elinikää, kun otetaan huomioon missä on rakenteen rasitetuimmat kohdat ja sijoittaa hitsit muualle. Matalalla hitsipalolla sekä hyvällä hitsausjäljellä ja hitsin jälkikäsitteilyllä, esimerkiksi hionnalla, on suunnittelun lisäksi suuri merkitys hitsisauman hyvyyteen. (Vähäkainu s. 48)

### 3.5 Hitsiliitosten väsymisiän selvitys

Kuten väsyminen ylipäättään, hitsiliitosten väsymisen teorit ovat saatu laajalla kokeellisella testaamisella. Kokeiden tuloksia on hyvä verrata järkevillä tilastollisilla menetelmillä, koska esimerkiksi eri laboratorioiden saamat mittaustulokset voivat erota toisistaan. Tätä eroavaisuutta voi ilmentyä vaikka kokeelliset menetelmät olisivat identtiset. (Dobmann et al. 2016)

Kun hitsiliitosten väsymistä aletaan tutkimaan, on hyvä valita oikea menetelmä halutun vastauksen tarkkuuden sekä kappaleen monimutkaisuuden mukaan. Jotkut menetelmät ovat hyvin yksinkertaisia ja nopeita tehdä, mutta ne antavat yleensä sopivan vastauksen vain yksinkertaisiin rakenteisiin. Fricke et al. (2006, s. 1) mukaan, väsymisiän selvitysmenetelmää valittaessa, on tärkeää ottaa huomioon hitsattavan rakenteen materiaali, kappaleen geometria ja rakenteeseen kohdistuva rasitus.

Väsymistarkastelu voidaan jakaa kahteen eri ryhmään riippuen siitä, halutaanko tarkastella rakenteen paikallisia jännityksiä vai kokonaisjännityksiä. Jos väsymistarkastelussa huomioidaan pelkästään ulkoisia rasituksia ja momentteja tai kriittisen tarkastelukohdan nimellisjännityksistä, käytetään väsymisiän selvityksessä globaalia lähestymistapaa. Toisaalta jos tarkastellaan tarkkaan määriteltyä kohtaa sekä sen jännityksiä puhutaan paikallisesta lähestymistavasta. Tällöin saadaan selville huippujännityksiä rakenteiden heikoimmista kohtaa ja voidaan tarkastella väsymisen aiheuttamien säröjen etenemistä. Väsymisiän selvitystä voidaan lähestyä myös rakenteellisten jännitysten kautta mikä yhdistää paikallisen ja globaalin lähestymistavan. (Fricke et al. 2006, s. 6)

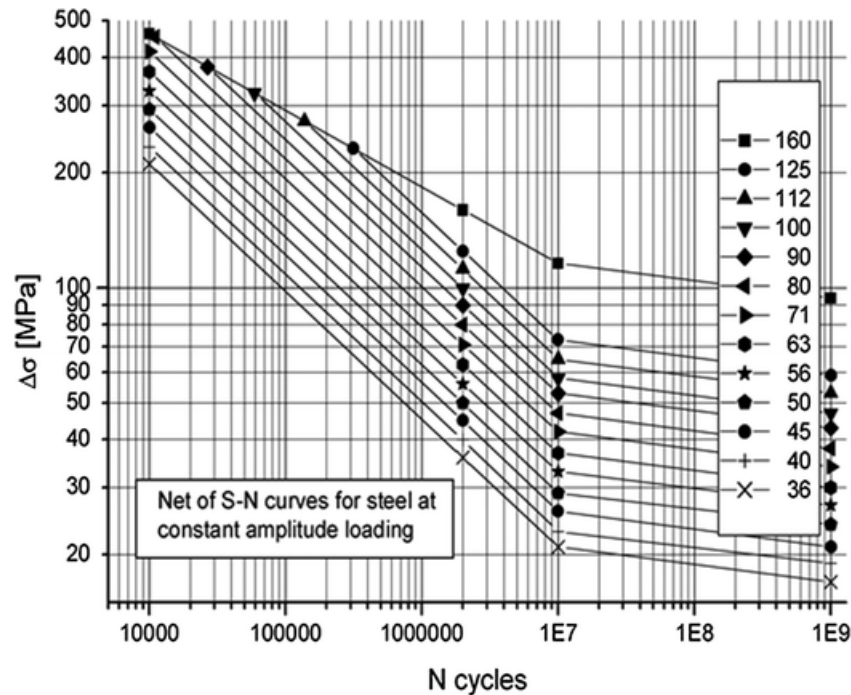
#### 3.5.1 Nimellisjännitysmenetelmä

Nimellisjännitysmenetelmä on yksi yksinkertaisimmista laskutavoista saada selville hitsiliitoksen väsymiskesto. Tämä menetelmä on myös eniten käytetty laskentatapa hitsiliitoksille kokonaisjännitysten kautta. Rakenteeseen vaikuttava jännitys on kuitenkin oltava tarkkaan määritelty ja rakenteen hitsiliitoksen läheisyydessä ei saa olla sen jännityksiin vaikuttavia geometrisiä muotoja, esimerkiksi isoja aukkoja tai palkin kaaria. (Dobmann et al. 2016) Nimellisjännitysmenetelmässä tulokseen vaikuttaa myös suuresti hitsin laatu, väsymisluokka (FAT) sekä itse käytettävät pohja- ja hitsimateriaalit (Fricke et al. 2006, s.14).

Nimellisjännitysmenetelmässä jännitys-sykli-käyrä sisältää kaksitoista käyrää mitkä kertovat hitsityyppien väsymisenkestosta. Yksi käyrästä on hitsaamattoman rakenteen perusaineen käyrä. (Dobmann et al. 2016) Muut käyrät kertovat miten FAT-arvo vaikuttaa



väsytysikään. Eri hitsiliitosten muodolle, hitsityypille, rasiustyypille ja valmistuslaadulle on määritelty omat FAT-arvot. (Fricke et al. 2006, s. 15) Kuvassa 5 on esitetty Whölerin käyrästössä miten eri FAT-arvo vaikuttaa väsymisikään.



**KUVA 5.** Jännitys-venymäkäyrä teräkselle eri FAT-arvoilla (Dobmann et al. 2016).

Kyseisen menetelmän tulokset eivät ole enää tarkkoja, kun kappale monimutkaistuu. Vaikka hitsiliitoksen väsymiskesto saadaan näillä menetelmillä nopeasti selville, rakenteen monimutkaistuksessa tulokset alkavat antamaan vääriä vastauksia. (Dobmann et al. 2016) IIW myös huomauttaa, että nimellisjännitysmenetelmä voi monimutkaistua, koska jokaiselle rakenteen komponentille täytyy olla tutkittuna omat väsymisdatat (Hobbacher 2009).

### 3.5.2 Hotspot menetelmä

Hotspot menetelmässä selvitetään hitsin elinikä käyttämällä hitsin juuressa esiintyvää jännitystä. Dobmann et al. (2016) mukaan tämän jännitys selvitetään yleensä finite element analyysiä käyttäen. Nimellisjännitysmetodiin verrattaessa hotspot metodi on paljon monimutkaisempi koska tämän hot spot -jännityksen laskemiseksi täytyy selvittää kaikki hitsiliitokseen kohdistuvat rasitukset. Näiden kaikkien rasituskomponenttien avulla saadaan selville hitsiliitoksen juureen kohdistuva jännitys. (Dobmann et al 2016)

Hotspot menetelmää käytetään pääasiassa, kun sauman hitsi ja jännityksen suunta ovat noin kohtisuorassa toisiinsa nähden. Tällöin voidaan olettaa, että väsymisestä johtuva

halkeama syntyy hitsin rajaviivaan. Tätä menetelmää ei kuitenkaan voida käyttää, jos virhe kasvaa hitsin sisältä tai sen juuresta. (Dobmann et al. 2016)

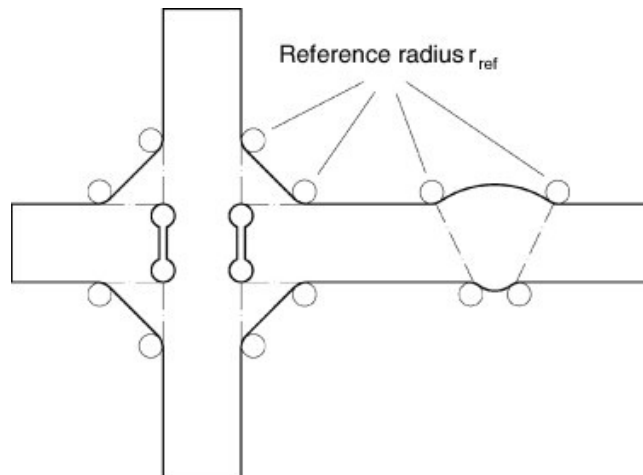
Hotspot menetelmän käyttöä suositellaan, jos rakenteen jännitystä ei pystytä selvittämään sen monimutkaisen geometrian takia, jos tarkastelupisteen geometria, esimerkiksi hitsikulman suuruus, ei ole yhteensopiva suunnitteludokumentaatioiden kanssa, joita käytetään nimellisjännitysmenetelmässä. Hotspot menetelmää suositaan myös, jos FEM analyysi on tehty ja tarkasteltavasta jännitysalueesta on saatu käytettävät tulokset hotspot menetelmän käyttöön. (Dobmann et al. 2016)

Vaikka hotspot menetelmä antaa tarkemman kuvan monimutkaisempiin rakenteisiin kuin nimellisjännitysmetodi, ei kyseistä metodologia voida soveltaa kaikkiin tilanteisiin. Dobmann et al. (2016) huomauttaa että, rakennetta täytyy ensin kokeellisesti testata ja todeta, että virheet eivät ala hitsin sisältä. Menetelmään kuuluu myös ekstrapolointia mikä tuo aina epävarmuutta vastauksiin. Näistä huolimatta kyseistä menetelmää käytetään paljon laivarakentamisessa sekä putkimaisissa rakenteissa.

### **3.5.3 Lovijännitysmenetelmä**

Lovijännitys menetelmää käytetään usein, kun muut menetelmät antavat ristiriitaisia tuloksia. Muut menetelmät eivät anna käytettäviä tuloksia monimutkaisten rakenteiden takia ja joissakin tapauksissa jännityksiä on vaikea tai mahdotonta saada selville. Lovijännitys menetelmässä saadut tulokset ovat yksiselitteisiä, koska tuloksena on tarkkaan laskettu paikallinen jännitys halutussa kohtaa tietokoneella mallinnettua rakennetta. (Dobmann et al. 2016) Tällä menetelmällä saadaan selville huippujännityksen, joka aiheuttaa rakenteeseen ensisijaisesti murtuman (Pradana et al. 2017).

Huippujännitykset sijaitsevat hitsin rajaviivassa sekä hitsin juuressa. Tällöin näihin yhtymäkohtiin mallinnetaan 1 mm säteinen kaari, perusrakenteen ollessa yli 5 mm paksuista. Rakenteiden paksuuden ollessa ohuempaa, käytetään 0.05 mm säteisiä kaaria. (Al Zamzami & Susmel 2018) Kuvassa 6 on esitetty kaarien paikat hitsiliitoksessa.



**Kuva 6** Esimerkki hitsatun rakenteen mallintamisesta, kun käytetään lovijännitysmenetelmää (Ahmadi et al. 2012).

Näiden kaarien kohdalta voidaan esimerkiksi selvittää rakenteen jännityksiä, joita voidaan myöhemmin vertailla sallittuihin jännityksiin. (Ahmadi et al. 2010)

### 3.5.4 Murtumismekaniikkamenetelmä

Murtumamekaniikassa tutkitaan säröjen sekä säröjen tyylisten epäkohtien käyttäytymistä. Koska murtuman eteneminen on väsymisessä hallitseva ilmiö ja hitsatut rakenteet käyttäytyvät lovellisten ja syöpyvien rakenteiden tavoin, voidaan väsymisiän selvittämisessä käyttää murtumamekaniikkaa. (Dobmann et al. 2016) Niemen (VTT tutkimus) mukaan murtumismekaniikkaa voidaan käyttää hitsattujen rakenteiden tutkimuksessa, kun rakennetta ei olla ennen kokeiltu, särön kasvu esiintyy käytön aikana, turvallisuusriskit tai taloudelliset riskit ovat suuria, valmis rakenne sijoitetaan poikkeuksellisen haastavaan ympäristöön esimerkiksi arktisiin olosuhteisiin tai jos rakenteen laskennallinen ikä on ylitetty. Niemi kuitenkin muistuttaa, että perinteistä lujuuslaskentaa ei voida unohtaa vaan murtumismekaniikan lakeja käytetään lujuusopin rinnalla.

Väsymisestä aiheutuvan murtuman etenemistä voidaan havainnollistaa murtuman pituuden muutoksena yhden syklin aikana. Tutkimusten jälkeen on huomattu, että murtuman etenemiseen vaikuttaa minimijännityksen suhde maksimijännitykseen, eli jännityssuhde  $R$  sekä jännityksen intensiteettikerroin (*stress intensity factor*)  $\Delta K$ . Murtuman etenemiselle on myös pyritty löytämään lakeja, joilla voitaisiin ennustaa halkeaman kulkua. Näistä tunnetuimpia ovat Parisin ja Formanin yhtälöt. Kokeellisista tuloksista voidaan laatia esimerkiksi  $a-n$  -käyrä mikä havainnollistaa murtuman pituuden kasvua syklien edetessä tai  $\log da/dn - \log \Delta K$  -käyrän mistä voidaan tarkastella jännityksen intensiteettikertoimen vaikutusta särön kasvunopeuteen. (Ewalds & Wanhill 1985, s. 24)

## 4. VÄSYMISIÄN SELVITYS

### 4.1 Ohjelman käyttämä laskentametodi

Analyysin tekoon käytettävällä Ansys Workbench -ohjelmalla oli kaksi eri metodia väsymisiän laskemiseen, jännitysikä- ja venymäikämetodi. Joissain tapauksissa voidaan käyttää myös murtumamekaniikkaa. Näistä kahdesta venymäikä on laajemmin käytetty metodi. Jännitysikämetodia on käytetty enemmän, kun huomioidaan pelkästään rakenteen kokonaisikä, eikä epäkohdan syntyminen tai jatkuminen ole oleellista. Venymäikää käytetään, kun halutaan olla tarkempia taas epäkohtien syntymisestä. (Browell & Hancq 2006)

Jännitysikämetodissa käytetään tapaukselle muokattua S-N -käyrää, kun taas venymäikämetodissa käytetään jännitysikäsuhte-kaavaa, jonka parametrit valitaan laskettava olevan rakenteen ja materiaalin mukaan. (Browell & Hancq 2006) Tässä analyysissä käytettiin jännitysikämetodia, jolla saatiin tarkemmat tulokset.

### 4.2 Analyysin kulku

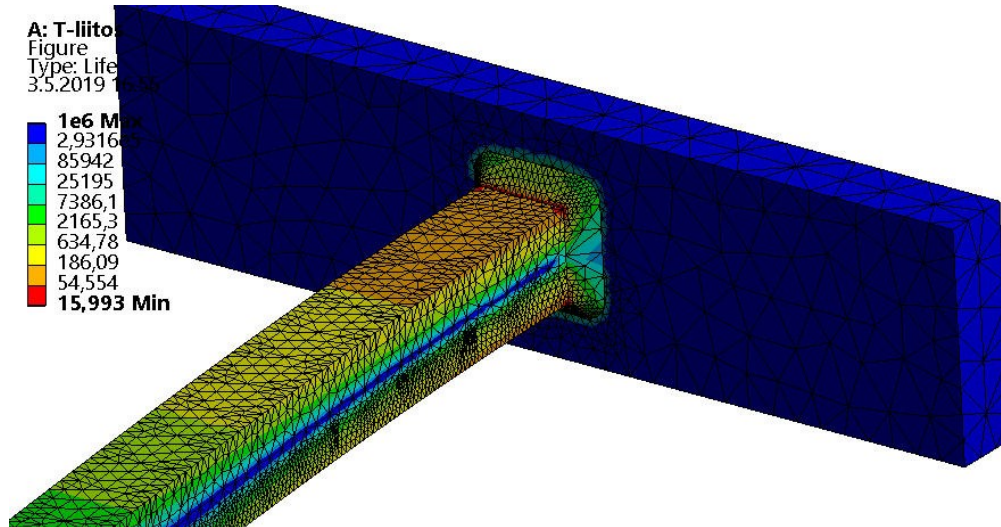
Väsymisiän selvityksessä vertailtiin kahta ympäri hitsattua palkkia. Ensimmäisessä tapauksessa tarkasteltiin ympäri hitsattua neliskanttista palkkia, jonka jälkeen tarkasteltiin myös ympäri hitsattua pyöreää palkkia. Lopuksi saatuja tuloksia vertailtiin yhdestä kiinteästä kappaleesta tehtyyn rakenteeseen, joka oli dimensioiltaan sama mitä ensimmäinen hitsattu neliskanttinen palkki.

Analyysi aloitettiin mallintamalla palkin Siemens NX ohjelmalla. Neliskanttisen palkin poikkipinta-ala oli 20 cm levyinen neliö ja palkin pituus oli kaksi metriä. Pyöreän palkin poikkipinta-alan halkaisija oli myös 20 cm. Molemmissa tapauksissa hitsisauma kiersi koko rakennetta ja hitsisauman korkeus oli 5 mm. Hitsaamaton rakenne oli mitoiltaan samanlainen mitä ensimmäinen neliskanttinen palkki, ilman hitsisaumaa.

Mallintamisen jälkeen palkkien väsymisiän selvitys tehtiin Ansys Worckbench ohjelmalla. Palkkien taustalevy tuettiin kaikilta muilta sivuilta paitsi hitsipinnalta ja palkkia rasitettiin sen päästä 10000 N voimalla.

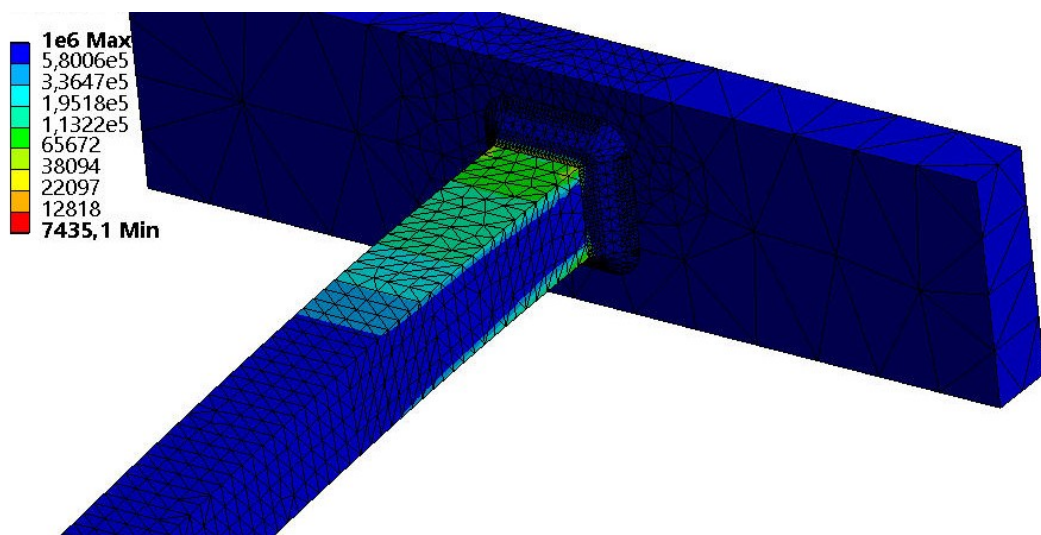
### 4.3 Palkkien väsymisiät

Neliskanttisen palkin väsymisikää tarkasteltaessa huomattiin, että palkin pienin väsymisikä ilmenee samassa kohtaa missä palkilla on suurin rasitus. Väsymisiän jakautuminen palkin rakenteessa on esitetty kuvassa 7.



*Kuva 7. Palkin väsymisikä 10000 N rasituksella.*

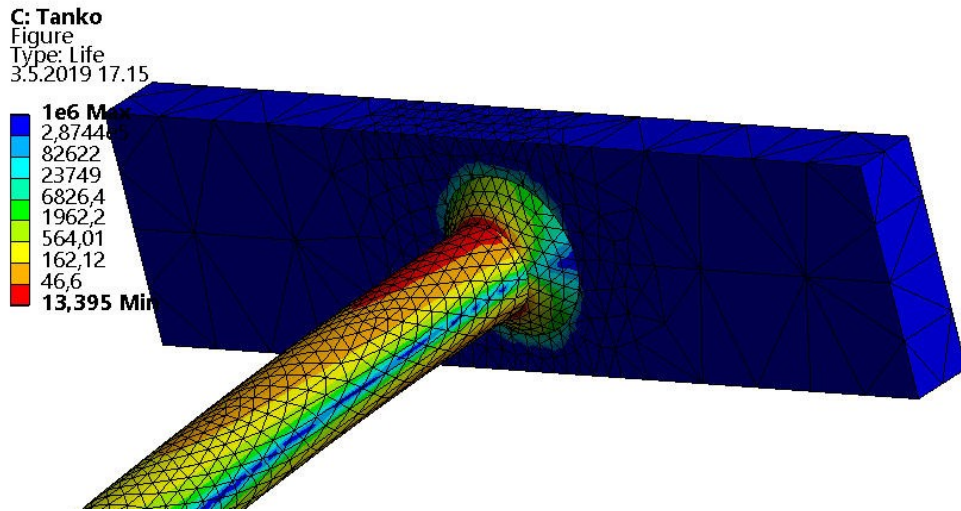
Analyysin mukaan palkin pienin väsymisikä on noin 16 sykliä. Tämä rakenne siis antaisi periksi todella nopeasti. Vertailun vuoksi rasitusta alennettiin 1000 N ja tarkasteltiin kuinka paljon palkin ikä muuttuu rasitusta vähennettäessä. Tulokset on esitetty kuvassa 8.



*Kuva 8. Palkin väsymisikä 1000 N rasituksella.*

Palkin ikä suurenee tämän jälkeen huomattavasti. 1000 N rasituksen alla palkki kestäisi tällöin 7435 sykliä.

Kuvassa 9 on esitetty miten väsymisikä jakautuu pyöressä hitsatussa palkissa.

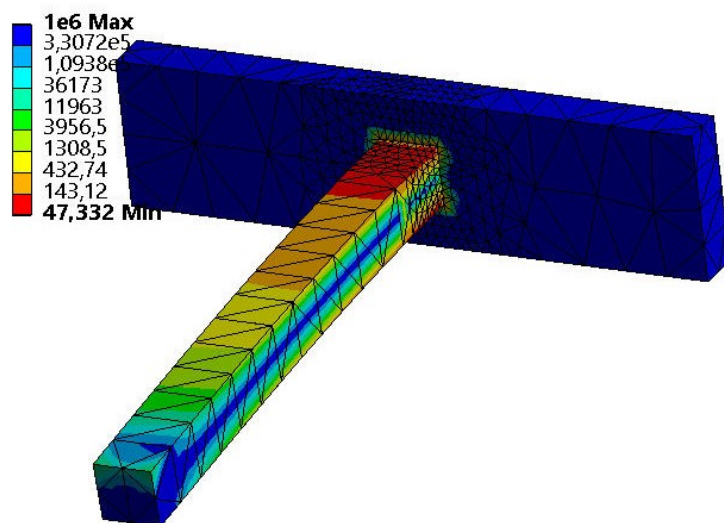


**Kuva 9.** Palkin väsymisikä 10000 N rasituksella.

Pyöreä palkki kestäisi annetulla rasituksella noin 13 sykliä. Tämä on muutaman syklin ero verrattuna neliskanttiseen palkkiin.

#### 4.4 Vertailu kiinteään kappaleeseen

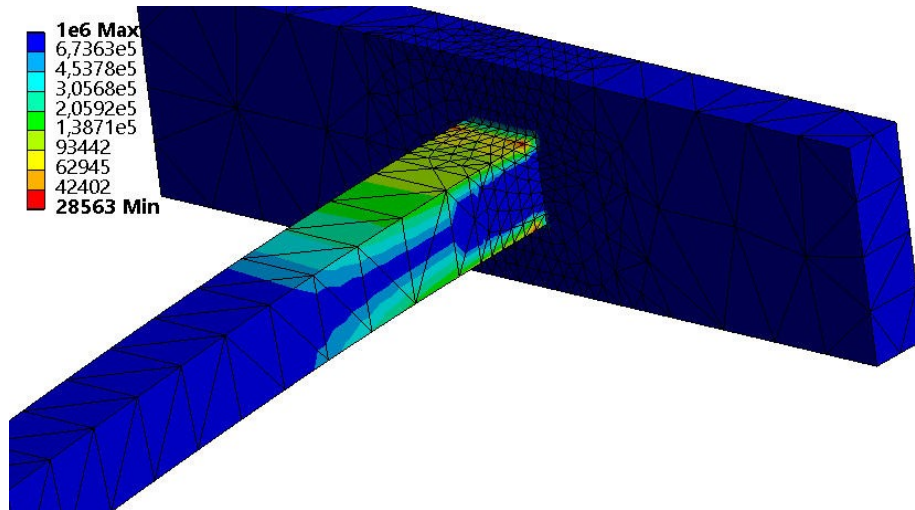
Lopuksi tarkasteltiin, miten väsymisikä muuttuu, kun neliskanttisen palkin rakenne muutetaan kiinteäksi, ei hitsatuksi rakenteeksi. Palkin dimensiot ja rasituksen suuruus ja kohta pidettiin aluksi samana. Kuvassa 10 on esitetty rakenteen väsymisiän muutos palkkia pitkin mentäessä.



**Kuva 10.** Palkin väsymisikä 10000 N rasituksella.

Palkin pienin väsymisikä löytyi palkin ja alustan kulmasta, kohtusuorassa tasossa rasi-  
tusta kohden. Palkin pienin väsymisikä analyysin mukaan oli noin 47 sykliä.

Koska syklien määrä 10000 N rasituksella oli todella pieni, tarkasteltiin vielä lopuksi pal-  
kin ikää, kun rasitus laskettiin 1000 N. Kuvassa 11 on esitetty tulokset analyysin jälkeen.



**Kuva 11.** Palkin väsymisikä 1000 N rasituksella.

Kuvan mukaan rakenne kestää nyt 28563 sykliä, joka on huomattavasti enemmän mitä  
10000 N rasituksen alla. Analyysin tuloksista myös huomataan että, todennäköisin  
paikka väsymismurtumalle on hieman kulman jälkeen, eikä suoraan kulman kohdalla.

## 5. TULOSTEN TARKASTELU

Analyysin tulokset tukivat teoriaa. Hitsatun neliskanttisen ja pyöreän palkin väsymisiän ero oli huomattavasti pienempi mitä kiinteän rakenteen väsymisikä. Tässä tarkastelussa tangon poikkipinta-ala tai poikkipinnan muoto ei huomattavasti vaikuttanut väsymisikään. Neliskanttisen tangon väsymisikä oli noin 16 sykliä ja pyöreän tangon noin 13 sykliä. Kiinteän kappaleen väsymisikä nousi melkein nelinkertaiseksi verrattuna hitsattuihin rakenteisiin. Kiinteän kappaleen kulma kuitenkin oli rakenteen heikoin kohta.

Rasitusta madallettaessa 1000 N:iin, myös väsymisikä nousi huomattavasti. Neliskanttisen, hitsatun rakenteen iäksi tällöin saatiin 7435 sykliä ja hitsaamattoman palkin iäksi 28563 sykliä. Analyysin mukaan, hitsattu palkki antoi tässäkin rasituksessa perisi hitsisauman kohdalta, mutta kiinteän rakenteen murtumiskohta näytti liikkuvan hieman palkkia eteenpäin.

Tulokset antoivat hyvin kuvaa siitä, miten hitsattu palkki reagoi väsyttävän rasituksen alla ja miten väsymisikä muuttuu, kun rakenne tehdään kiinteäksi. Tuloksista olisi saanut tarkemmat, jos rakenteen verkotus olisi tehty tarkemmin, mutta näillä verkotuksilla ohjelma antoi vertailtavia tuloksia.



## 6. YHTEENVETO

Väsymistä ilmenee rakenteissa, joihin kohdistuu dynaamista rasitusta. Rasituksen jatkuessa materiaaliin ilmestyy virheitä, jotka kasvavat nopeasti silmin nähtäväksi halkeamaksi. Riippuen siitä kuinka kauan rakenne kestää rasitusta, voidaan elinikää laskea ja tutkia erilaisilla metodeilla.

Hitsaus aiheuttaa rakenteeseen muodonmuutoksia, jotka lyhentävät rakenteen elinikää huomattavasti. Esimerkiksi hitsisauman ympärille voi muodostua jäännösjännityksiä, jotka pyrkivät avaamaan hitsauksessa syntyneitä muita materiaalivirheitä. Hitsaus aiheuttaa materiaaliin myös muita materiaalivirheitä, jotka kasvavat helposti dynaamisen rasituksen aikana.

Hitsattujen rakenteiden ikää voidaan laskea erilaisilla metodeilla. Metodien valintaan vaikuttaa suuresti rakenteen monimutkaisuus sekä kuinka tarkkaa tulosta tarvitaan. Voi myös olla mahdollista, että jokin metodi on yleisemmin käytetty tietyssä sovellusalassa, kuten esimerkiksi laivojen rakennuksessa.

Hitsattujen rakenteiden väsymisikään voidaan vaikuttaa huomattavasti. Hyvä suunnittelu sekä turhien hitsien välttäminen pidentää rakenteen elinikää. Hitsisaumoja voidaan myös loppukäsitellä, jolloin saumasta saadaan entistä pidempikestoinen.

# LÄHTEET

- Anderson, T.L. (2017). Fracture Mechanics: fundamentals and applications, CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton
- Blodgett, O.W. (1963). Design of weldments, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, OH,
- Browell, R. & Hancq A. (2006). Calculating and Displaying Fatigue Results. <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/whitepaper/fatigue.pdf>. Viitattu 4.6.2019
- Ewalds, H.L. & Wanhill, R.J.H. (1984). Fracture mechanics, Arnold, London
- Dobmann, G., Hobbacher, A.F., Jonsson, B., Kassner, M. & Marquis, G. (2016). Guidelines on Weld Quality in Relationship to Fatigue Strength, Springer, Cham.
- Marrs, J. (2011). Machine Designers Reference, Industrial Press, Inc, New York.
- Pajunen, S. & Salmi, T. (2010). Lujuusoppi, Pressus, Tampere.
- Pradana, M.R., Qian, X., Shen, W. & Swaddiwudhipong, S. (2017). An extrapolation method to determine the effective notch stress in circular hollow section X-joints, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 40(2), pp. 160-175.
- Hobbacher, A.F., (2009). The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components – A comprehensive code recently updated, International Journal of Fatigue, Vol. 31, pp. 50-58.
- Ahmadi, A., de Bruyne, F., Fricke, W., Hoppe, A., Sonsino, C.M. & Zhang, G. (2012). Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints – Background and applications, International Journal of Fatigue, Vol 34, pp. 2-16.
- Vähäkainu, O. (1994). Rautaruukin teräkset, Hitsaajan opas, Otava, Keuruu.
- Fricke, W., Radaj, D. & Sonsino, C.M. (2006). Fatigue assessment of welded joints by local approaches, Woodhead Publishing.
- Radaj, D. (1992). Heat Effects of Welding, Springer.

Forrest, P.G. (1962). *Fatigue of Metals*, Pergamon press.

Santaoja, K. (2017). *Rasitusopin käsikirja*, Picaset, Helsinki.

Bathias, C. (2013) *Fatigue Limit in Metals*, John Wiley & Sons, Incorporated.

Kanchidurai, S. (2017). Effect of hammer peening with tungsten coating on fatigue properties of carbon steel under rotating bending, *Koroze a Ocharana Materiálu*, Prague, Vol 61(4), pp. 149-154.

Ashcroft, I., Maskery, I., M.Everitt, N., T.Aboulkhair, N. & Tuck, C. (2016). Improving the fatigue behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: Influence of heat treatment and surface quality, *Materials & Design*, Elsevier BV.