



**ARTIC X54-TYYPIN RAITIOVAUNUN KORIRAKENTEEEN VÄSYMISKESTÄ-  
VYDEN ARVIOINTI MURTUMISMEKAANIKAN AVULLA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2021

Kim Louhula

Tarkastajat: Professori Timo Björk

TkT Antti Ahola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Kim Louhula

### **ARTIC X54-tyypin raitiovaunun korirakenteen väsymiskestävyyden arviointi murtumismekaniikan avulla**

Konetekniikan diplomityö

2021

70 sivua, 27 kuvaa, 8 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk ja TkT Antti Ahola

Avainsanat: Raitiovaunu, Artic X54, murtumismekaniikka, lineaarinen murtumismekaniikka, Franc2D, painofunktio, väsymiskestävyys.

Tässä työssä tutkitaan Helsingin kaupungin liikenneliikelaitoksen tilaamien ja Skoda-Trans-techin valmistamien Artic X54 -tyypin raitiovaunun korirakenteen kestoikää murtumismekaniikan avulla. Työn tavoitteena on selvittää valitun rakenneyksityiskohtaan hitsiliitoksen kestoikä käyttämällä Franc2D-ohjelmaa ja painofunktio menetelmää. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin korin rakenteesta alimalli, johon mallinnettiin särö. Särön virtuaalisen kasvattamisen kautta saatiin ekvivalentti jännitysintensiiteettikerroin eri särön pituuksille. Työssä mallinnettiin rakenteeseen aluksi hyvin pieni, rakennevirhettä kuvaava alkusärö, jonka pituus oli 0,05 millimetriä. Ensimmäisessä vaiheessa tämä särö kasvatettiin pituuteen, jossa saavutettiin särön kasvun kannalta kriittinen jännitysintensiiteettikerroin. Toisessa vaiheessa säröä kasvatettiin niin pitkälle, että voitiin arvioida epästabiliin särönkasvun alkaneen. Särön kasvattamisen jälkeen saatujen parametrien avulla laskettiin tutkitun rakenneyksityiskohtaan kestoikä. Kestoiän vertailulaskelmat tehtiin painofunktio-menetelmällä. Saatujen tulosten mukaan tutkittu rakenneyksityiskohta ei näytä olevan altis nopealle särönkasvulle. Franc2d-ohjelmalla tehdyn simulaation mukaan särön ydintyminen ja kasvaminen kriittiseksi viaksi on epätodennäköistä Artic X54-vaunutyyppin suunnitellun käyttöajan aikana.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Kim Louhula

### **Artic X54-type Tram body fatigue resistance assessment by using fracture mechanics**

Master's thesis

2021

70 pages, 27 figures, 8 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Timo Björk and D.Sc (Tech) Antti Ahola

Keywords: Tram, Artic X54, fracture mechanics, linear fracture mechanics, Franc2D, weight function, fatigue resistance.

In this work, the durability of the body structure of an Artic X54 tram ordered by the City of Helsinki and manufactured by Skoda-Transtech were investigated using fracture mechanics. The aim of the work is to determine the lifetime of the welded joint of the selected structural detail using the Franc2D program and the weight function method. In this work, a sub-model of the body structure were designed and implemented. Initial crack was modeled in this sub-model. Through the virtual crack propagation, an equivalent stress intensity factor for different crack lengths was obtained. Length of the initial crack was 0.05 millimeters. In the first step, this crack was propagated to the length where the critical stress intensity factor allows the crack propagation further. In the second stage, the crack was propagated to the length whereabouts unstable crack growth might be possible. The parameters obtained after crack propagation were used to calculate fatigue life of the studied structural detail. Comparison of fatigue life calculation were performed using the weight function method. According to the results obtained, the structural detail examined does not appear to be prone to fracture. According to a simulation with Franc2d, crack growing into a critical structural failure is unlikely during the design life of the Artic X54 tram type. The results of the Franc2D program and the weight function method differed, and in addition, only one of the three different weight function method gave a comparable result. The difficulty in using the weight function could be due to the geometry of the sub model. However, the result of the franc2D program and the weight function method were in the same direction.

## KIITOKSET

Haluan kiittää professori Timo Björkiä tärkeistä neuvoista, jotka auttoivat minut haasteiden yli. Kiitän Antti Aholaa myös arvokkaista vinkeistä. Kiitoksen sana myös työnantajalleni Helsingin kaupungin liikennelaitokselle mahdollisuudesta perehtyä murtumismekaniikkaan konkreettisen esimerkin avulla. Erityiset kiitokset pojilleni Samuelille ja Danielille, joiden leikit ja touhut toivat inspiraatiota omaan touhuuni. Lopuksi kiitän vaimoani Eijaa, jonka tukea ja rohkaisua ilman en olisi tästä urakasta suoriutunut. Olen onnellinen, että minulla on teidät.

Helsingissä 8.12.2021

Kim Louhula

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$A$	Pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$F$	Voima	[kgm/s <sup>2</sup> ]
$J$	J-integraali	[N/mm]
$K$	Jännitysintensiiteettikerroin	[MPa √mm]
$K(a)$	Jännitysintensiiteettikerroin särön pituuden suhteen	[MPa]
$\Delta K$	Jännitysintensiiteettikertoimen vaihtelualue	[MPa √mm]
$\Delta K_{th}$	Jännitysintensiiteettikertoimen kynnyсарvo	[MPa √mm]
$M$	Taivutusmomentti	[Nm]
$N$	Kuormitusyккли	[--]
$W$	Taivutusvastus	[mm <sup>3</sup> ]
$a$	Särön pituus	[mm]
$a_{th}$	Särön pituuden kynnyсарvo	[mm]
$g$	painovoiman aiheuttama kiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$r$	Plastisen alueen säde. Särön kärjen alue	[mm]
$y_f$	Osavarmuuskerroin väsymisen suhteen	[--]
$\sigma_a$	Jännitys särön kärjen kohdalla	[MPa]
$\sigma_b$	Taivutusjännitys	[MPa]
$\sigma_{hs}$	Rakenteellinen hot spot-jännitys	[MPa]
$\sigma_m$	Kalvojännitys	[MPa]
$\sigma_{nl}$	Epälineaarinen jännitys	[MPa]
$\sigma_o$	Kappaleeseen vaikuttava jännitys	[MPa]

$\sigma_y$	Materiaalin myötölujuus	[MPa]
Artic X54	Artic X54-tyypin raitiovaunun. Valmistaja Skoda-Transtech Oy	
HKL	Helsingin kaupungin liikenneliikelaitos	
STT	Skoda-Transtech Oy	
FRANC2D	Fracture Analysis Code 2D, Kaksiulotteinen särömallinnusohjelma	
IIW	International institute of Welding	
XFEM	Extended Finite Element Method	

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	13
2	Teoria.....	15
	2.1 Murtumismekaniikka .....	15
	2.2 Murtumismekaniikan keskeiset teoriat .....	16
	2.3 Rakenteen kuormitus.....	20
	2.4 Jännitysten luokittelu rakenneyksityiskohdissa .....	21
	2.5 Nimellisjännitys .....	22
	2.6 Rakenteellinen Hot Spot-jännitys menetelmä.....	23
	2.7 Pääjännitys .....	24
	2.8 Väsyttävä kuormitus.....	25
	2.9 Väsymiskestävyys murtumismekaniikan ja rakenteellisen Hot Spot – jännityksen menetelmällä .....	26
	2.10 Kestoiän laskeminen kuormitushistorian avulla .....	27
	2.11 Särön kasvaminen alkusäröstä kriittiseen särökokoon.....	28
	2.12 Jännitysintensiiteettikertoimen määrittäminen elementtimenetelmällä.....	29
	2.13 Kappaleen virtuaalinen malli .....	30
	2.14 Painofunktio .....	31
	2.14.1 Painofunktiomenetelmä IIW-suosituksen mukaan.....	32
3.	Korirakenteen yksityiskohdan valinta murtumismekaaniseen tarkasteluun .....	34
	3.1 Artic X54-raatiovaunutyyppin väsymiskestävyuden arviointi .....	34
	3.1.1 Koordinaatisto .....	35
	3.1.2 Väsymismitoituksen lähtöarvot .....	36
	3.2 Rakenneyksityiskohdan määrittäminen.....	38
	3.3. Alimallien muodostaminen .....	43
	3.3.1 Alimalli A .....	43

3.3.2 Alimalli B .....	44
3.4 Jännitysjakautaman määrittäminen painofunktiota varten.....	47
4. Tulokset .....	49
4.1 Jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualueet eri laskentamenetelmillä .....	49
4.2 Rakenneyksityiskohdan W1.1 esiintyvät jännityksen kokeesta C27 saaduilla tuloksilla.....	53
4.3 Rakenneyksityiskohdassa W1.1 väsymiskestävyys murtumismekaniikkaa soveltaen .....	55
4.4 Väsymiskestävyys Rakenteellisen Hot Spot-jännitys –menetelmällä ja ajokokeesta C27 .....	56
5 Analyysit tutkimuksesta.....	57
5.1 Rakenneyksityiskohdan W1.1 väsymiskestävyyden murtumismekaniikan laskentatulosten vertailu.....	57
6 Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet .....	60
Lähteet .....	62

## Liitteet

Liite 1. Väsymiskestävyyden laskelmat

Liite 2. Painofunktiomenetelmä

## Kuvaluettelo

Kuva 1. Säröjen avautumismoodi I, II ja III (Carpinteri 2021, s. 61)

Kuva 2. Kolmiulotteisen mallin tarkastelu kaksiulotteisella mallilla. X3-akselin arvot supistuvat nolnaan (Zehnder 2012, s. 8).

Kuva 3. Eri jännityslajien vaikutus rakenteen paksuuden yli (Hobbacher 2016, s. 36).

Kuva 4. Jännitysalkiot särön kärjen alueella (Pennala 1972, s. 312).

Kuva 5. Rainflow-analyysin laskeminen jännityshistoriasta (Hobbacher 2016, s. 114-115)

Kuva 6. Jännitysintensiteetikertoimen kasvu kuormitusyökkien suhteen (Carpinteri 2021, s. 788).

Kuva 7. Särön avautumistapa ja voimien sekä reunaehtoien sijainti (Zehnder 2012, s. 34)

Kuva 8. Särön syvyyden ja pituuden suhde  $a/c$  (Hobbacher 2016, s. 33)

Kuva 9. Laskennassa ja mallintamisessa käytetty koordinaatisto (Transtech 2017, s. 5)

Kuva 10. IIW-suositus rakennekohdan W1.1 liittostyypille (Hobbacher 2016, s. 45)

Kuva 11. Venymäliuskojen paikat A-korimoduulin lattiarakenteessa.

Kuva 12. Rakenneyksityiskohdan W1.1 sijainti (Transtech 2018, s. 61).

Kuva 13. Jännitys jakauma W1.1 läheisyydessä (Transtech 2018, s. 230).

Kuva 14. Lattiarakenteen teräslevyt, jotka ovat hitsattu yhteen. Rakenneyksityiskohta W1.1. Kuva tehty Navisworks-ohjelmalla.

Kuva 15. W1.1-kohdan lattia rakenne pelkistettynä. Kuva tehty Navisworks-ohjelmalla.

Kuva 16. Rakenneyksityiskohdan W1.1 hitsin merkinnät.

Kuva 17. Alilammin A mitat.

Kuva 18. Alimalli B mittoineen.

Kuva 19. CASCA-ohjelmalla tehdyn alimallin yleiskuvaus ja reunaehdot sekä valmiin hitsisauma sijainti rakenteessa (oranssilla).

Kuva 20. CASCA-ohjelmalla tehdyn verkon tiheys. Pienin elementtikoko 0,0625 mm

Kuva 21. alimallin B pääjännityksen suunta

Kuva 22. Jännitys jakauma mitattiin hitsiliitoksen kärjen tasalta kappaleen paksuuden läpi.

Kuva 23. Franc2D-ohjelmalla saatu jännitysintensiiteettikerroin suhteessa särön kokoon.

Kuva 24. Jännitysintensiiteettikertoimen kynnyksarvon ylityskohta.

Kuva 25. Painofunktiolaskelmissa jännitys jakauma. Mitattu Franc2D-ohjelmalla.

Kuva 26. Jännitysintensiiteettikertoimen jakauma laskettuna painofunktiolla

Kuva 27. Rakennesyksityiskohdan W1.1 kestoiän määritykset eri menetelmillä. Vasen pystyakseli kuvaa kuormitusyklejä ja oikea väsymiskestävyyttä vuosissa.

## Taulukkoluetelo

Taulukko 1: Taulukko 1. Kuormitustyyppien jako kuormanvaihtojen esiintymistaajuuksien mukaan.

Taulukko 2. Rakenneyksityiskohdan W1.1 hitsausaumalle annetut vaatimukset ja lujuuslaskennan tulokset

Taulukko 3. FRANC2D-ohjelmalle syötetyt materiaalitiedot ja reunaehdot.

Taulukko 4. Särönpituuden arvo intensiteettikertoimen kynnyksarvon ylityksen kohdalla.

Taulukko 5. Kokeen C27 mittaustulokset auki laskettuina

Taulukko 6. Särön kasvu  $a_0 = 0,05 \text{ mm} \rightarrow a_c = 3,2 \text{ mm}$

Taulukko 7. Särön kasvu  $a_0 = 0,05 \text{ mm} \rightarrow a_i = 2,03 \text{ mm}$

Taulukko 8. Särön kasvu  $a_i = 2,03 \text{ mm} \rightarrow a_f = 3,2 \text{ mm}$

# 1 Johdanto

Tämä diplomityö käsittelee raitovaunun teräksisen korirakenteen väsymiskestävyyden määrittämistä murtumismekaniikan avulla. Murtumismekaniikan aihealue valikoitu tutkimusmetodiikaksi siksi, että työssä haluttiin tutkia kokeellisesti jo tehtyjen lujuuslaskentatuloksia turvallisuuskriittisimmistä näkökulmasta.

Työssä tutkimuskohteena olivat Helsingin kaupungin liikenneliikelaitoksen Skoda-Trans-tech Oy:ltä (myöhemmin STT) tilaamien Artic X54-tyypin raitiovaunusarja. Murtumamekaanisten tarkastelujen tavoitteena oli selvittää hitsatun runkorakenteessa olevan särömaisen virheen kehittymistä kriittiseen särökokoon. Työssä selvittiin, miten kauan kestää, että rakenteessa esiintyvä alkusärö tai särömainen virhe kasvaa särökokoon, jossa stabiili särön kasvu alkaa. Tutkimuksessa etsittiin myös sitä rajaa, millä särönkasvu muuttuu epästabiiliksi. Toisin sanoen, miten pitkä särö saa olla, ennen kuin rakenneaurio ylittää kriittisen rajan, joka aiheuttaa rakenteen epästabiilin särön kasvun.

Tämän työn tulosten ajateltiin tutkimuksen alussa kehittävän HKL:n raitiovaunukaluston elinkaaren aikaista huolto- ja kunnossapito-ohjelmaa. Jos tutkimustulokset antavat aiheita huolto- ja kunnossapito-ohjelman kehittämiseen, niin ennen kaikkea kolarien jälkeisiin tarkastuksiin ja vaativan korjaushitsaamiseen on kiinnitettävä huomiota.

Työn tuloksia vertailtiin STT:n HKL:lle toimittaman Artic X54-tyypin raitiovaunun korin lujuuslaskentareporttiin. Tässä työssä käsiteltiin A-korimoduulin lujuuslaskentareporttia. Lujuuslaskennassa väsymislujuuden arviointi perustu Hot spot- menetelmään. Väsymislujuuden tulosten verifiointi tehtiin valmiin raitiovaunun rakenteiden rasiusten venymäliuskamittauksilla. Tämän työn laskemissa on käytetty hyödyksi kokeen antamia tuloksia, jolloin saadaan mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaava tilanne.

Työssä valittiin STT:n tekemien lujuuslaskelmien pohjalta rakenneyksityiskohta, jolle tehtiin murtumismekaaninen tarkastelu. Tavoitteena oli selvittää, millä särön pituudella  $a_{th}$  saavutetaan kynnyksjännitysintensiteettikerroin  $\Delta K_{th}$ , joka yleisesti teräkselle on  $63 \sqrt{\text{mm}}$  (Hobacher, 2012, s. 8).

Seuraavana tavoitteena oli selvittää jännitysintensiteettikertoimen kehittymistä, kun rakenteessa oleva särö kasvatetaan 80%:in tarkasteltavan rakenteen paksuudesta. Viimeisenä tutkimuksen vaiheena oli laskea rakenneyksityiskohdan väsymiskestoikä alkusäröstä aina siihen asti, että särö on kasvanut edellä mainittuun kriittiseen säröpituuteen. Työssä ei otettu huomioon käyttölämpötilan vaikutusta (esim.  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) tai iskumaisia ylikuormitustilanteita (kolari, kiskoilta suistuminen). Näiden tekijöiden huomioonottamisen katsottiin kasvattavan tämän opinnäytetyön laajuutta liikaa. Jälkimmäiset kysymykset ovat kuitenkin tärkeitä mahdollisessa jatkotutkimuksessa.

Valitun korirakenteen yksityiskohdasta luotin kaksi alimallia, joiden avulla pystyttiin kaksulotteiseen särön mallintamiseen (Franc2D- ohjelmalla). Seuraavaksi suoritettiin särön kasvun tarkastelut ja kestoikälaskemat. Lopuksi laskelmia vertailtiin vielä painofunktiolla tehtyihin laskelmiin. Seuraavana toimenpiteenä työssä tehtiin kestoikälaskelmien vertailua kulunaikaisten jännitysmittausten tuloksiin ja STT:n laatimaan huolto- ja kunnossapito-ohjelmaan. Viimeisenä tehtävänä hahmoteltiin jatkotutkimusaiheita ja kysymyksiä.

## 2 Teoria

Tässä luvussa käsitellään niitä lujuusopin teorioita, joita tässä työssä sovellettiin. Aluksi esitellään murtumismekaniikan kehittymistä sekä perusteita lyhyesti työn kannalta oleellisilta osin. Tämän jälkeen esitellään rakenteita kuormittavien jännityksiä sekä väsymislajuuden teoriaa. Luvun viimeiset alaluvut käsittelevät STT:n lujuuslaskelmissa käytettyä rakenteellista Hot spot- menetelmän (HS) teoria lyhyesti. Luvun jälkimmäinen osa käsittelee rakenteen kestoajan määrittämistä, etenkin väsyttävän kuormituksen mukaan.

### 2.1 Murtumismekaniikka

Murtumismekaniikka on kiinteiden materiaalien ja niitä tehtyjen rakenteiden kestävyyttä arvioiva lujuusopin tieteenhaara. Murtumismekaniikan tehtävänä on selvittää rakenteessa olevan särön tai särömäisen virheen kasvun edellytyksiä ja syitä. Pääsääntöisesti syinä säröjen kasvuun on syynä fysikaaliset ilmiöt, kuten: materiaalin ominaisuudet, siihen kohdistuvat jännitystasot, kappaleen ainevahvuus, hitsausprosessi, käyttölämpötila ja väsyminen (Pennala 1972, s. 307). Murtumismekaniikka lähti kehittymään 1940-luvulta lähtien. Merkittäviä murtumismekaniikan kehityshetkiä ovat olleet Toisen maailmansodan aikaiset Marshall-apukuljetuksissa olleiden laivojen vaurioitumisen syiden selvittely. Tuolloin laivanteollisuudessa oli siirrytty hitsaamalla tapahtuvaan teräsrakentamiseen. Edellä mainitun apukuljetukset tapahtuivat kylmillä merialueilla, jossa laivojen rungot kärsivät pahoja vaurioita, jopa katkeamisia tapahtui ja useita laivoja menetettiin. Toinen murtumismekaniikan kehittymistä eteenpäin vieneitä tapahtumia ovat useat kaupallisen lentoliikenteen alkuvuosikymmeninä sattuneet onnettomuudet, kuten vuonna 1954 Comet-suihkukoneille tapahtuneet onnettomuudet, joissa molemmissa runkorakenteessa sijainnut alkusärö laajeni nopeasti mittavaksi vaurioksi ja molemmat koneet tippuivat. Onnettomuustutkinnan yhteydessä opittiin väsyttävän kuormituksen merkitys rakenteen vaurioitumiselle. Myös kiskoliikenteen parissa on sattunut onnettomuuksia, joiden syyksi paljastui rakenteen väsymismurtuma. Vuonna 1998 Saksassa pikajunan pyörän kehä irtosi akselilta väsymisestä johtuneen särön kehittyessä rakennevaurioiksi (Zehnder 2012, s. 1). Nykyään rakennevaurioiden tutkiminen murtumisme-

kaniikan avulla on tullut tarkemmaksi ja kustannustehokkaammaksi tietokoneiden laskenta-tehon paranemisen myötä. Nykyään saatavilla on elementtimenetelmäohjelmia, jonka avulla säröjen kasvua voidaan simuloida. Lisäksi murtumismekaniikan alalla on olemassa standardeitua menetelmiä materiaalin murtumiseen vaikuttavien parametrien määrittämiseen. (Carpinteri 2021, s. 93.)

Materiaalien käyttäytymisellä on suuri merkitys murtumismekaniikassa. Hauraasti käyttäytyville materiaaleille on tyypillistä äkillinen ja särökokoon nähden aikaisin tapahtuva loppumurtuma. Käytännössä materiaalin mikro- ja makrotasolla vaikuttava energia ei riitä vastustamaan särön syntymistä. Näin ollen särö pääsee suhteellisen vaivattomasti etenemään materiaalissa. Sitkeillä materiaaleilla taas sidosenergiaa on suhteessa enemmän ja näin ollen kykyä vastustaa särön kasvua.

## 2.2 Murtumismekaniikan keskeiset teoriat

Murtumismekaniikassa keskeistä on tutkia särönkasvua ja edellytyksiä sille. Kun ulkoisesti kuormitettuun kappaleeseen syntyy esim. hitsausprosessin sivutuloksena särö tai särömainen virhe, syntyy virheen ympäristöön jännityskeskittymä. Jännityskeskittymä on pääpiirteittäin sitä suurempi, mitä isompi särö on suhteessa kappaleen kokoon. Jännitysintensiiteettikerroin kuvaa särön kasvun intensiteettiä ja jännitys särön kärjessä lähenee ääretöntä rajattomasti kimmoisassa materiaalissa. Jännityksen, jännitysintensiiteetin ja särön pituuden suhdetta kuvaa seuraava yhtälö:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi a}} \quad (1)$$

Yhtälössä 1  $K$  on jännitysintensiiteettikerroin,  $\sigma$  on rakenteeseen vaikuttava ulkoinen jännitys ja  $a$  särön pituus. Särö on geometrinen poikkeama, jonka lähettyville syntyy jännityskeskittymiä, jotka voivat olla ympäröivää jännitystilaa huomattavasti suurempia. Jännitysintensiiteettikerroin  $K$  kuvaa särön koon (geometrinen poikkeama) ja sitä ympäröivän jännitystilan yhteisvaikutusta. Jännitysintensiiteettikerroimen  $K$  kasvu ennustaa särön kasvun edellytyksiä

rakenteessa. Toisaalta yhtälöstä 1 voidaan nähdä, että rakenne, jossa on särö, pystyy kantaamaan vaurioitumatta sitä pienempää kuormitusta, kun isompi särö siinä on.

Särön kasvun laskemiseen vaikuttaa se, käyttäytyykö kappaleen materiaali sitkeästi vai hauraasti. Hauraasti käyttäytyville kappaleille on ominaista, että särön kärjen alueella on pienenkö plastisoituva alue. Sitkeästi käyttäytyville materiaaleille tyypillistä on, että plastisoituva alue on suurehko suhteessa kappaleen kokoon. Toisaalta plastisen alueen muotoon ja suuruuteen vaikuttaa myös rakenteeseen kohdistuva kuormitus. Kappaleeseen kohdistuva ulkoinen tekijä, kuten korkea tai matala ympäristön lämpötila, aiheuttaa materiaalin lämpölaajenemista tai –kutistumista, mikä synnyttää sisäistä jännitystä. Tästä esimerkkinä on hitsisauman jäähtymisen yhteydessä syntynyt jäännösjännitys.

Plastisen alueen koko ja muoto antavat viitteitä siitä, millä laskentatavalla särön kehittymistä on analysoitava. Plastisoituvan alueen säteen noudattaessa likipitään ehtoa  $r_p \sim K_I^2 / \sigma_o^2$  voidaan sitä pitää pienenä (Zehnder 2012, s. 4). Plastisen alueen koon ollessa pieni voidaan särön kasvua selvittää lineaarista murtumismekanismiin (linear-elastic fracture mechanism, LEFM) avulla, jonka keskeinen termi on jännitysintensiteettikerroin  $K$ . Lineariselastisella murtumismekaniikalla jännitysintensiteettikerroin voidaan ratkaista kaavalla:

$$K = M_k(a) * Y(a) * \sigma_o \sqrt{\pi * a}, \quad (2)$$

Kaavassa  $M_k(a)$  on rakenteen geometriasta johtuvan lovivaikutuksen kerroin,  $Y(a)$  särön muotokerroin ja  $\sigma_o$  on kappaleeseen vaikuttava ulkoinen kuorman aiheuttama jännitys sekä  $a$  särön pituus. Tämä kaava ei ota huomioon särön kärjessä vaikuttavaa plastista vyöhykettä. Jännitysintensiteettikerroin on mahdollista ratkaista myös käyttäen J-integraalia, joka ottaa huomioon plastisen vyöhykkeen. Oikeastaan J-integraali on yleispätevämpi tapa selvittää särön kasvun parametreja. J-integraalin kehitti Rice ja Cherepynov (Ikonen 1980, s. 21). J-integraali perustuu integroimistiehen ja antaa tuloksena muodonmuutosenergiatiheyden. Jännitysintensiteetin ja J-integraalin välillä on yhteys:

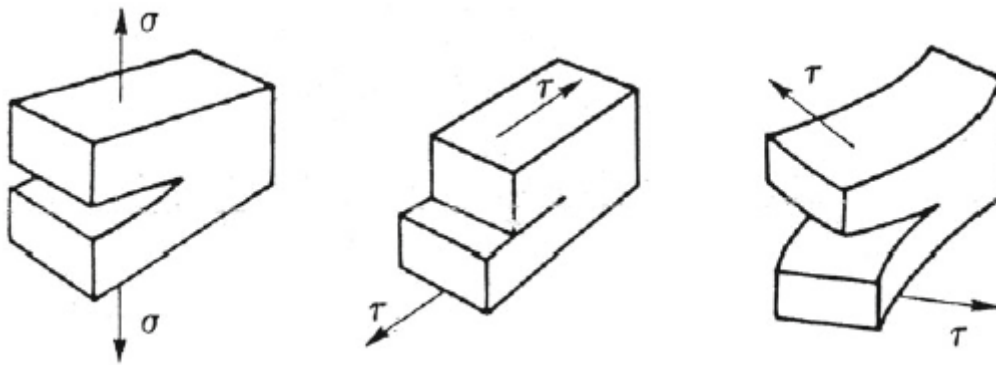
$$K = \frac{E}{1-\nu^2} * J , \quad (3)$$

missä  $E$  on materiaalin kimmomoduuli,  $\nu$  Poissonin luku ja  $J$  tarkoittaa J-integraalia. Esimerkiksi tässä työssä käytettävä Franc2D-ohjelma ratkaisee jännitysintensiiteettikertoimen käyttäen hyödyksi J-integraalia (Franc2D User's Guide 1991, s. 18).

Lineaarisen murtumismekaniikan soveltamisen edellytyksenä on, että särön kärkeen muodostuva plastinen vyöhykkeen  $r$  on selkeästi pienempi kuin särön pituus  $a$ . Jos tämä ehto pätee, voidaan jännitysintensiiteettikerroin laskea aikaisemmin esitetyllä yhtälöllä 2 (Zehnder 2012, s. 3). Kuten edellä on mainittu, särön kasvun kannalta jännitysintensiiteetin kynnyisarvo teräkselle on  $K_{th} = 63 \text{ MPa} \sqrt{\text{mm}}$ . Tämä särönkasvun kynnyisarvo on otettava huomioon väsyttävän kuormituksen alaisena olevan rakenteen väsymiskestoniän määrittämisessä. Mikäli väsyttävän kuormituksen aikana rakenneyksityiskohdassa olevan särön jännitysintensiiteettikertoimen  $K$  arvo on alle  $K_{th}$  ei särö kasva. (Hobbacher 2016, s. 7-8.) Mikäli edellä kuvattu särönkasvu kynnyisarvo ylittyy ( $K > K_{th}$ ) on särönkasvulle edellytykset. Tällöin materiaalin sitkeydellä on merkitystä. Jännitysintensiiteettikertoimen  $K$  ratkaiseminen yhtälöllä 2 on mahdollista, kun särön kärjessä plastisoituva alue on riittävän pieni. Tämän alueen koon määrittämiseen pätee ehto: särön pituus  $a \ll r$  ja  $r \sim K^2/\sigma_y^2$ . Tällöin voidaan olettaa, että materiaalissa tapahtuu plastisoitumista vain pienellä alueella (Zehnder 2012, s. 3-4). Kun edellä kuvatut ehdot pätevät, särön kärjen läheisyydessä tapahtuu plastisoitumista, mutta kappaleen materiaali on muuten väsymisen kannalta elastisella alueella ja lineaarista murtumismekaniikka voidaan soveltaa.

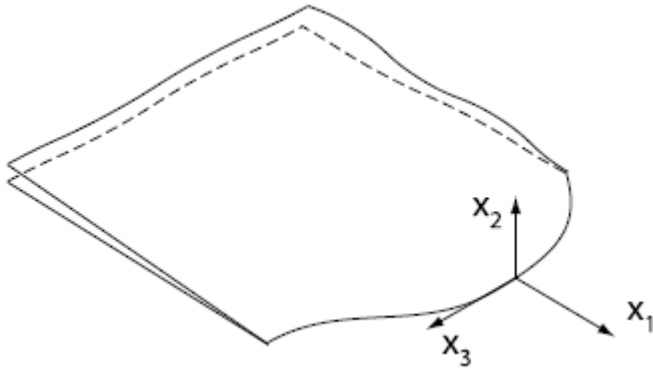
Plastisen särön kärjen ympärillä vyöhykkeen ollessa suuri, ei jännitysintensiiteettikertoimen  $K$  laskennassa voida soveltaa lineaarista murtumismekaniikkaa. Tällöin jännitysintensiiteettikerroin lasketaan J-integraalin avulla. J-integraalilla lasketaan energian vapautumista suhteessa särön avautumiseen. J-integraali perustuu energiaperiaatteeseen, eli sen avulla selvitetään energia, joka vapautuu särön kasvaessa. J-integraalista on lisää luettavissa lähteistä (Zehnder 2012, s. 31-54 ja Ikonen 1980, s. 21-35). J-integraali on yleisesti käytössä ja se on laskenta-algoritmi useiden laskentaohjelmien taustalla.

Säröjen avautumiselle on olemassa kolme erilaista moodia, jotka on esitetty Kuva 1. Vaikka todellisessa tilanteessa kappaleeseen voi kohdistua kuormitus, jotka avaavat säröä kaikilla kolmella moodilla, on moodi I kriittisin. Kappaleen ollessa vedon tai puristuksen lisäksi taipuudessa, säröä avaa moodit I. Moodi II syntyy leikkausjännityksen vaikutuksesta. Moodi III on vaikutukseltaan tyypillisesti vähäinen. Särön kuormitukseen liittyvä jännitysintensiiteettikerroin merkitään kirjallisuudessa  $K_I$ ,  $K_{II}$  ja  $K_{III}$ , avautumismoodin mukaan.



Kuva 1. Säröjen avautumismoodi I, II ja III (Carpinteri 2021, s. 61).

Säröt ydintyvät, kasvavat ja kasvu johtaa lopulta loppumurtumaan kolmiulotteisesti. Tästä huolimatta voidaan ennustelaskelmia ja särön kasvukriteereitä laskea virtuaalisesti myös kaksiulotteisilla malleilla. Särönkasvua voidaan tarkastella paikallisesti sen kärjessä ( $x_1, x_2$ , Kuva 2) ja jos särö on oletettu olevan kappaleen leveyden mittaunen ( $x_3$  -suunnassa), voidaan kolmiulotteista säröä tarkastella kaksiulotteisella mallilla. Tässä työssä särön kasvukriteereitä tutkittiin todellisesta kolmiulotteisesta kappaleesta projisoidulla kaksiulotteisella mallilla. Kuva 2 esittää sattumanvaraista särörintamaa kolmiulotteisessa tasossa. Kun tarkastellaan aivan särön kärkeä koordinaation tasolla, voidaan huomata, että särötapaus muuttuu kaksiulotteiseksi. Kuormien synnyttämä jännityskenttä esiintyy  $x_1, x_2$  -tasokoordinaatistossa.



Kuva 2. Kolmiulotteisen mallin tarkastelu kaksiulotteisella mallilla.  $x_3$ -akselin arvot supistuvat nolnaan (Zehnder 2012, s. 8).

### 2.3 Rakenteen kuormitus

Rakenteeseen vaikuttava kuormitus voi olla staattista, kvasistaattista tai dynaamista. Staattinen kuormitus käsitetään ajan suhteen käytännössä muuttumattomana, kvasistaattinen kuormitus muuttuu ajan suhteen hitaasti ja dynaaminen kuormitus taas muuttuu ajan suhteen nopeasti. Nämä kuormitustyyppit voidaan jakaa kuormanvaihtojen esiintymistaajuuksien mukaan, kuten Taulukko 1:

Taulukko 1. Kuormitustyyppien jako kuormanvaihtojen esiintymistaajuuksien mukaan.

Kuormitustyyppi	Esiintymistaajuus [Hz]
Staattinen kuormitus	$\leq 10^{-4}$
Kvasistaattinen kuormitus	n. $10^{-1}$
Dynaaminen kuormitus	$\geq 1$

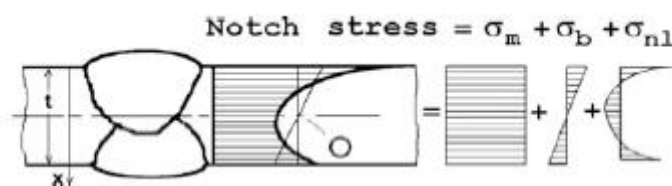
Dynaaminen kuormitus on murtumismekaniikan kannalta kriittisin kuormitustapa. Edellä kuvatun taulukon mukaan dynaamisessa kuormituksessa jännitystä aiheuttavien voimien suunta ja suuruus vaihtelevat vähintään 1 Hz. Taulukko 1 kuormitustyyppijako on suuntaa antava. Edelleen kuormitustapojen aiheuttamat jännitykset voidaan jakaa kolmeen luokkaan (Karhunen J. et al. 2004, s. 336):

- I. Staattinen kuormitus. Jännitys  $\sigma$  nousee arvosta 0 ja pysyy vakiona
- II. Tykyttävä kuormitus. Jännitys  $\sigma$  nousee arvosta 0 arvoon  $\sigma_{max}$  ja vaihtelee tämän jälkeen arvolla  $\sigma_a$  keskijännityksen  $\sigma_m$  molemmin puolin siniaallon kaltaisesti.
- III. Vaihtokuormitus. Tässä jännitys vaihtelee vedon  $\sigma$  ja puristuksen  $-\sigma$  välillä, ts. jännitys vaihtelee nollan molemmin puolin.

Näiden kuormitustapausten lisäksi on tyypillistä, että rakenteiden kuormitusta kuvataan näiden yhdistelminä. Esimerkiksi, jos rakennetta kuormittaa kuormitustapaus III liikkeen aikana, synnyttää muun muassa painovoima  $g$  staattisen kuormituksen. Tällöin kuormituskuvaajaan yhdistetään kuormitustavat I ja III. Murtumismekaniikassa tarkasteltaessa särön kehittymistä arvioitaessa kuormitustapa III ja tapaus, jossa kuormitustavat I ja III yhdistellään, ovat olennaisimpia.

#### 2.4 Jännitysten luokittelu rakenneyksityiskohdissa

Murtumismekaanisissa tarkasteluissa on merkityksellistä tunnistaa eri jännityskomponentit. Laskennan kannalta eri jännitysten samanaikaisen vaikutus saattaa tehdä siitä hyvin monimutkaista. Tämän takia tässä työssä käytetyn IIW-suosituksessa on määritellyt yleistyksiä, joiden avulla pystytään väsymisanalyysi tekemään yksinkertaisemmin (Hobbacher 2016, s. 36). Rakenneyksityiskohtiin (Kuva 3) vaikuttavat jännityskomponentit ovat kalvojäännitys  $\sigma_m$ , taivutusjäännitys  $\sigma_b$  ja epälineaarinen jännityshuippu  $\sigma_{nl}$ .



Kuva 3. Eri jännityslajien vaikutus rakenteen paksuuden yli (Hobbacher 2016, s. 36).

Kalvojäännitys  $\sigma_m$  on kappaleen poikkipinnalla koko paksuuden läpi tasaisesti jakautuva jännitys. Kalvojäännitys lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$\sigma_m = \frac{1}{t} * \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) * dx \quad (4)$$

Taivutusjäännitys  $\sigma_b$  on tasaisesti kappaleen paksuuden poikki lineaarisesti jakautuva jännitys. Taivutusjäännityksen nollakohta on kappaleen keskilinjan kohdalla pisteessä O.

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} * \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) * \left(\frac{t}{2} - x\right) * dx \quad (5)$$

Epälineaarinen jännityshuippu  $\sigma_{nl}$  muodostuu kalvojäännityksen ja taivutusjäännityksen yhteisvaikutuksesta.

$$\sigma_{nl}(x) = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right) * \sigma_b \quad (6)$$

## 2.5 Nimellisjäännitys

Nimellisen jännityksen menetelmällä lasketaan tarkastelussa olevan kappaleen poikkileikkauksen alueella vaikuttavaa jännitystä. Vaikka nimellisen jännityksen menetelmä on monessa tapauksessa soveltuvin tapa selvittää rakenteen väsymiskestävyyttä, menetelmällä ei pystytä selvittämään rakenteessa olevien poikkeamien aiheuttamia jännityskeskittymiä. Nimellisen jännityksen menetelmällä voidaan selvittää rakenteessa vaikuttava primäärinen jännitys, muttei rakenteen geometriassa olevista poikkeamista (mm. reiät ja rivat) johtuvia sekundäärisiä jännityksiä tai mm. hitsiliitoksen kärjessä olevan loven vaikutuksesta esiintyviä tertiäärisiä epälineaarisia jännityksiä. Nimellisen jännityksen menetelmällä voidaan näin ollen määrittää väsymiskestävyys rakenteille, jotka ovat muodoltaan yksinkertaisia ja käytetty

materiaali käyttäytyy lineaaris-elastisesti nimellisen jännityksen tasolla tarkasteltuna. Tässä työssä keskityttiin hitsiliitoksen väsymiskestoisän tarkasteluun. Hitsiliitosta voidaan tarkastella rajaviivan tai juuren väsymisongelmana. Rajaviivaväsyminen on yleisempi, mutta juuren puolen väsyminen on rakenteen turvallisuuden kannalta monissa tapauksissa kriittisempi, koska sen visuaalinen toteaminen valmiista rakenteesta on vaikeaa. Rajaviivaväsymistä tarkasteltaessa Nimellisen jännityksen menetelmällä, rakenteen poikkipinnan yli vaikuttavan jännitys  $\sigma_w$  lasketan seuraavalla yhtälöllä (Karhunen 2004, s. 93):

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \quad (7)$$

Kaavassa  $N$  on rakenteeseen kohdistuva kuormitus,  $A$  rakenteen poikkipinta-ala,  $M$  kappaleeseen vaikuttava taivutusmomentti ja  $W$  taivutusvastus.

Seuraavassa alaluvussa käydään lyhyesti Hot Spot-jännitysmenetelmä. Tämä työn kannalta rakenteellinen Hot spot-jännitys menetelmä oli oleellinen, sillä Artic X54-tyypin raitiovauunun lujuuslaskennassa oli käytetty ko. menetelmää väsymiskestoisän määrittämisessä eri korin osissa.

## 2.6 Rakenteellinen Hot Spot-jännitys menetelmä

Rakenteellinen Hot Spot (HS)- jännitys menetelmä on Nimellisen jännityksen menetelmää kehittyneempi tapa rakenteen väsymiskestoisän määrittämisessä. HS – jännityksen menetelmässä periaatteena on etsiä rakenteen kriittisin hitsiliitos ja tämän liitoksen kannalta kriittisintä jännitystä  $\sigma_{hs}$ , joka tyypillisesti rajaviivaa vastaa kohtisuoraan vaikuttava jännitys. (Karhunen 2004, s. 395.) Laskennassa otetaan huomioon rakenteen kaikki primääriset ja sekundaariset jännityskeskittymiä aiheuttavat rakennepoikkeamat. Näin ollen tämä menetelmä mahdollistaa geometrialtaan monimutkaisen rakenteen väsymismitoituksen. HS-jännitys menetelmässä otetaan huomioon hitsisauman aiheuttamien lovijännitys varmuuskertoimien avulla. HS-jännitys menetelmällä rakenteessa olevien poikkeamien läheisyyteen syntyvä tertiääristä jännitystä  $\sigma_{nl}$  ei saada kuitenkaan laskennassa selville, vaan se sisältyy rakenteeseen sovellettavaan Wöhler-käyrään ja siitä saatavaan FAT-luokkaan. (Karhunen 2004, s. 395)

Määritelmän mukaan, HS-menetelmä rajoittuu hitsin kärjen läheisyyteen (Hobbacher 2016 s.18). HS- jännitys menetelmässä rakenteet ovat ideaaleja ja näin ollen ehjiä. HS-jännitys menetelmä on kustannustehokas tapa rakenteiden väsymisen määrittämiseen.

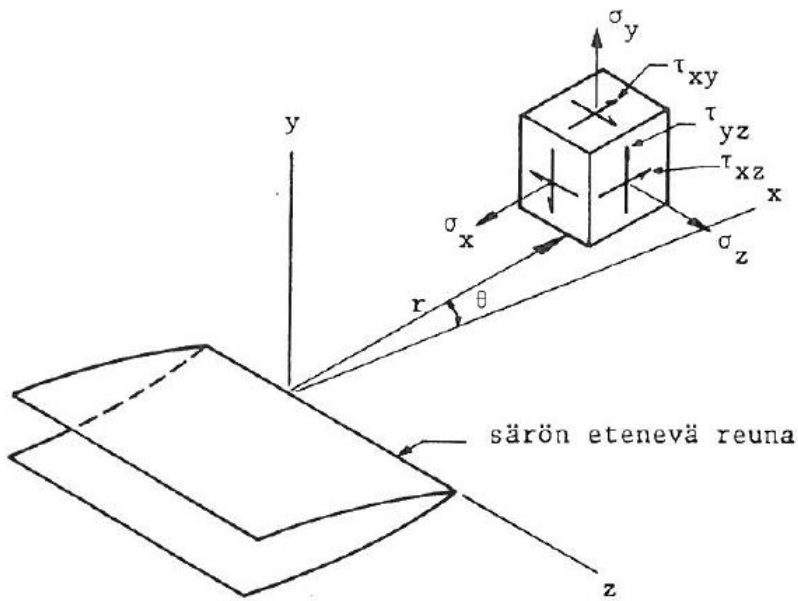
STT sovelsi Artic X54- tyyppin raitiovaunun korin lujuuslaskennassa HS-menetelmää käyttäen sen molempia periaatteita: FE-analyysia ja venymäliuskamittauksia. Periaatteena oli verifioida FE-analyysin perusteella saadut väsymiskestoisuudet valmiilla raitiovaunulla tehdyillä ajokokeilla, joiden aikana HS-menetelmällä saatujen kriittisten rakenneyksityiskohtien venymää mitattiin venymäliuskoilla.

Seuraavassa alaluvussa käydään lyhyesti pääjännityksen teoria. Tämä on työn kannalta oleellinen asia, sillä pääjännitys tai -jännitykset vaikuttavat särön kasvuun rakenteessa kuormituksen aikana.

## 2.7 Pääjännitys

Pääjännitysteoria on keskeinen teoria särön mallintamisen kannalta. Pääjännitysteorian mukaan särörintama etenee rakenteessa siihen voimakkaimmin vaikuttavaa jännitystä kohtisuorasti. Tämän työn tutkimuskohteena olevaan rakenteeseen mallinnetaan vain nimellisjännitys, joka syntyy nivelalueeseen kohdistuvien voimien suunnasta.

Pääjännityksillä tarkoitetaan kappaleeseen vaikuttavia, toisiaan kohtisuoraan olevia jännityksiä. Nämä kolme jännitystä esiintyvät aina kuormitetussa rakenteessa. Näistä kolmesta jännitysalkiosta yksi on itseisarvoltaan pienin ja toinen on suurin. Kuva 4 esittää normaali ja leikkausjännitysten jännitysalkioita. Näistä alkioista saadaan ensimmäinen ja toinen pääjännitykset, jotka vaikuttavat särön avautumiseen.



Kuva 4. Jännitysalkiot särön kärjen alueella (Pennala 1972, s. 312).

Seuraavassa alaluvussa käydään lyhyesti läpi väsyttävän kuormituksen laskemiseen liittyviä teorioita.

## 2.8 Väsyttävä kuormitus

Väsyttävä kuormitus on luonteeltaan vaihtuvaa. Esimerkiksi kuormitus voi vaihdella vedon ja puristuksen välillä tai vaihtuvalla amplitudilla. Väsyttävän kuormituksen laskennan kannalta olennaista on, että puhutaan jännityksen tai jännitysintensiteetin vaihtelualueesta. IIW-suosituksessa (Hobbacher 2016, s. 12) kuvataan väsymiskuormituksen jännitysalueen ja jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualueen seuraavilla yhtälöillä:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (8)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (9)$$

missä  $\Delta\sigma$  jännitysvaihtelualue on,  $\sigma_{max}$  on rakenteessa väsymisen kannalta esiintyvä suurin jännitys ja  $\sigma_{min}$  taas rakenteessa väsymisen kannalta pienin esiintyvä jännitys.

## 2.9 Väsymiskestävyys murtumismekaniikan ja rakenteellisen Hot Spot – jännityksen menetelmällä

Tässä työssä tehtävänä oli väsymiskestävyuden määrittämiseen murtumismekaniikan teoriaa soveltaen. Väsymiskestävyyttä arvioidaan kriittisimmin niin, että rakenteessa oletetaan alusta pitäen olevan särö tai särömäinen rakennevirhe. Väsymiskestävyyttä, toisin sanoen rakenteen kykyä vastusta kuormitusyökkien aiheuttamaan särön kasvua voidaan määrittää Parisin lain mukaisella kaavalla (Hobbacher 2016, s. 73):

$$\frac{da}{dN} = C_0 * \Delta K^m \quad (10)$$

missä  $da/dN$  särön kasvunopeuden derivaatta,  $C_0$  on vakio (tässä työssä laskelmissa käytettiin arvo  $C_0 = 3,00 \cdot 10^{-13}$ ),  $m$  on eksponentti (tässä työssä käytettiin arvoa  $m = 3$ ),  $\Delta K$  intensiteetikertoimen syklinen alue ja  $\Delta K_{th}$  on jännitysintensiteetikertoimen kynnysarvo, jonka alapuolisilla arvoilla särön kasvua ei katsota tapahtuvan (Hobbacher 2016, s. 73).

$$N = \int_{a_i}^a \frac{da}{C \Delta K^m} \quad (11)$$

missä  $N$  on kuormanvaihtojen (sykliä) lukumäärä.

STT käytti Artic X54-tyyppin raitiovaunun korin väsymistarkasteluissa elementtimenetelmää ja laskennassa Hot Spot-menetelmää (myöhemmin HS-menetelmä). Menetelmässä selvitettiin FE-mallista pääjännityksen aiheuttamat HS-jännitykset tämän tutkimukseen valitussa

rakenneyksityiskohdassa. Lisäksi vaunutyypille asetetun 40 vuoden käyttöiän takia kuormitussykliä määräksi saattoi tulla yli kymmenen miljoonaa, minkä vuoksi väsymiskestävyyttä arvioitiin seuraavilla laskentakaavoilla:

$$N = \left[ \sqrt[3]{\frac{1}{5} \frac{k_s * FAT_{hs}}{y_f \Delta \sigma_{hs}}} \right]^3 * 2 * 10^6 \quad (12)$$

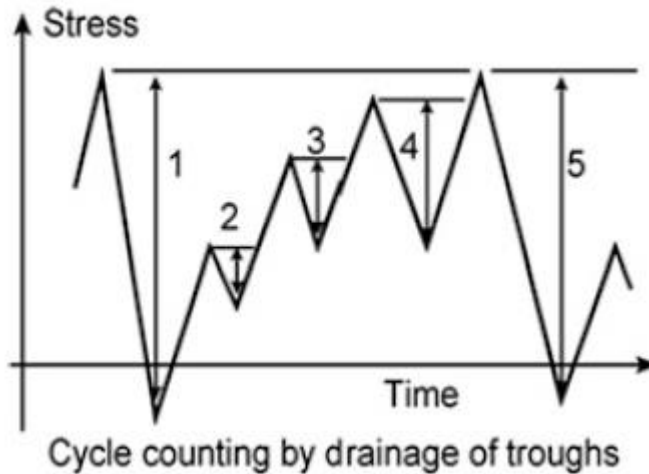
$$N = \left[ \sqrt[3]{\frac{1}{5} \frac{k_s * FAT_{hs}}{y_f \Delta \sigma_{hs}}} \right]^5 * 10^7 \quad (13)$$

missä  $FAT_{hs}$  on väsymisluokka,  $y_f$  on osavarmuuskerroin väsymisen suhteen,  $\Delta \sigma_{hs}$  on FE-analyysillä saatu rakenneyksityiskohdan ekvivalentti jännitysvaihtelualue ja  $k_s$  paksuuskerroin, joka alle 25 millimetriä paksulle levymateriaalille on 1. Seuraavassa alaluvussa käsitellään kuormitushistorian käyttöä kestoiän laskennassa. STT suoritti yhdessä HKL:n kanssa lujuuslaskennalla saatujen rakenneyksityiskohtien kestoikien verifioinnin valmiiseen koriin tehdyllä venymäliuskamittauksella.

## 2.10 Kestoiän laskeminen kuormitushistorian avulla

Rakenteen kestoikälaskelmat voidaan suorittaa erilaisilla laskentatavoilla. Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi rainflow-analyysi. Tätä metodologiaa käytettiin kokeen C27 tulosten analysointiin ja ekvivalentin jännitysheilahduksien  $\Delta \sigma_{evk}$  selvittämiseen.

Rainflow-analyysin teorian ensimmäisinä julkaisivat T. Endo ja M. Matsuishi vuonna 1968 (Cui et al. 2014, s. 186). Rainflow menetelmällä voidaan mitatusta jännityshistoriasta selvittää ekvivalentti jännitysheilahdus, kattaen koko rakenteen tai sen osan kuormitushistorian. Menetelmässä allokoidaan jännitysvaihtelut sopiviin luokkiin, kKuva 5 mukaan. Lopulta kaikki jännitysheilahdusluokkien arvot lasketaan yhteen ja tulokseksi saadaan ekvivalentti jännitysheilahdus.

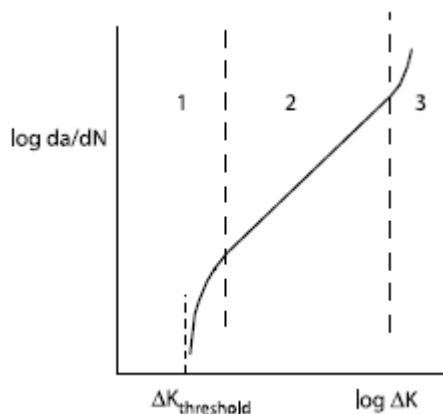


Kuva 5. Rainflow-analyysin laskeminen jännityshistoriasta (Hobbacher 2016, s. 114-115).

### 2.11 Särön kasvaminen alkusäröstä kriittiseen särökokoon

Yleisesti särön koko voidaan jakaa kolmeen alueeseen: Alkusärön  $a_i$  ydintymiseen, stabiiliin särön kasvuvaiheeseen ja kriittinen särökokoon saavuttamiseen, jolloin särön kasvu muuttuu epästabiiliksi ja päättyy rakenteen lopulliseen murtumiseen. (Kärnä 1977, s. 50.) Alkusärön  $a_i$  pituus on rakenteen kestoiän kannalta merkittävä tekijä. Alkusärön ydintymiseen ja särön kasvun alkamiseen vaikuttaa jännitysintensiiteettikertoimen kynnsarvon  $K_{th}$  ylittyminen. Teräkselle voidaan arvioida, että  $K_{th} = 63 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  (Hobbacher 2016, s. 8). Tämän arvon ylittäessä alkaa stabiili särönkasvuvaihe niin sanotun suurten säröjen kasvulain, kuten Parisin lain mukaan. Edelleen materiaaliominaisuudet, ulkoiset kuormitustekijät sekä rakenteen geometria vaikuttavat siihen, miten pitkäksi särö voi kasvaa stabiilisti. Stabiilin särön kasvun aikana jännitysintensiiteettikerroin  $K$  ja särön kasvunopeus ( $da/dN$ ) kasvavat. Särön kasvun edetessä tullaan jännitysintensiiteettikertoimen osalta kriittiselle rajalle  $K_{IC}$  ja särön pituuden osalta kriittiselle rajalle  $a_{cr}$ . Tämän jälkeen särön kasvu muuttuu epästabiiliksi, toisin sanoen särön kasvunopeus kasvaa jopa äänennopeuden tasolle. Epästabiili särönkasvu ennustaa rakenteen loppumurtumaa. Kuva 6 esittää jännitysintensiiteetin  $K$  kasvua väsyttävän kuormituksen aikana, kun kuormitus on vakioamplitudista. Alueella 1 särö (makro-

skooppinen) ydintyy, kun  $K_{th}$  arvo ylittyy. Alueella 2 tapahtuu särön stabiilia kasvua. Alueella 3 särön kasvu muuttuu epästabiiliksi, koska jännitysintensiiteettikerroin  $K$  ylittää murtositkeyden  $K_{IC}$ , mikä on materiaalivakio. Tässä työssä ei tarvittu tutkittavan materiaalin murtosikeysarvoa. Murtositkeys pystytään määrittämään spesifeillä kokeilla (Carpinteri 2021, s. 94-104).



Kuva 6. Jännitysintensiiteettikertoimen kasvu kuormitus syklien suhteen (Carpinteri 2021, s. 788).

## 2.12 Jännitysintensiiteettikertoimen määrittäminen elementtimenetelmällä

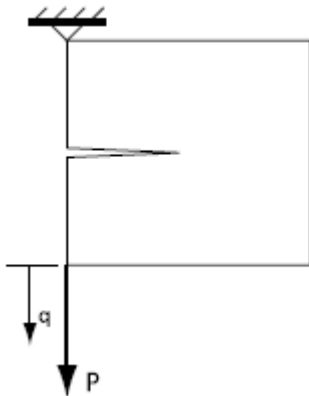
Tässä työssä särön kasvua rakenneyksityiskohdassa tutkittiin käyttämällä elementtimenetelmää. Elementtimenetelmä perustuu kappaleen jäykkyysohmatriisiin. Kappale jaetaan pieniin elementteihin, jotka koostuvat tasoelementin tapauksessa vähintään kolmesta (kolmiomalli) tai neljästä solmupisteestä (neliömalli). Menetelmässä lasketaan solmupisteiden siirtymiä. Yksittäisistä elementeistä koostuu koko kappaleen käsittävä jäykkyysohmatriisi (ratkaistaan matriisilaskennan avulla). Elementtimenetelmä soveltuu kaksi- ja kolmiulotteisiin laskentatapauksiin (Hakala 2012, s. 25).

Elementtimenetelmässä särön kasvun ennustamisen laskeminen on sitä tarkempaa, mitä tiheämpi verkotus malliin on laitettu. Verkotuksen osalta keskeistä on ottaa huomioon särörintaman etenemisen ja verkon koon suhde. Liian harva verkko ei anna välttämättä luotettavia tuloksia jännitysintensiiteettikertoimesta. Yleisesti ottaen särö etenee solmupisteestä toiseen,

koska FE-menetelmä laskee särön siirtymän solmupisteiden siirtymistä. (Zehnder 2012, s. 86-87.) Toisaalta esimerkiksi tässä työssä käytetty Franc2D-ohjelma verkottaa särön kärjen ympäristön uudelleen, riippuen särön kasvatusinkrementin koosta. Jännitysintensiteettiker-toimen tarkan laskemisen takia särön kasvatusinkrementti tulee olla lyhyt, tämä vaatii tiheää verkotusta. Toisaalta riskinä on, että malli verkottaa liian tiheästi, jolloin seurauksena voi olla laskenta-ajan pidentyminen tai ohjelman kaatuminen.

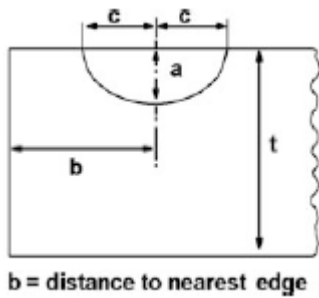
### 2.13 Kappaleen virtuaalinen malli

Tätä työtä varten piti pohtia, minkälainen teoreettinen malli valitaan murtumismekaaniseen tarkasteluun. Mallin valinnan kautta määrittyi laskentatavat. Elementtimalli muodostettiin Kuva 7 mukaisesti sillä poikkeuksella, että malli oli käännetty 90 astetta myötä päivään.



Kuva 7. Särön avautumistapa ja voimien sekä reunaehtoien sijainti (Zehnder 2012, s. 34).

Koska todellisuudessa rakenneyksityiskohta on kolmiulotteinen, tuli särörintaman  $a:c$ -suhde ottaa huomioon. IIW-suosituksen mukaan särön syvyyden ja pituuden standardi suhde tämän työn mukaisessa tapauksessa on  $0,2 \leq a:c \leq 1$  (Ahola et al. 2021, s. 3). Kuva 8 esittää särön mittojen suhdetta.



Kuva 8. Särön syvyyden ja pituuden suhde  $a/c$  (Hobbacher 2016, s. 33)

Seuraavassa alaluvussa käsitellään painofunktiota, mitä käytettiin tässä työssä.

#### 2.14 Painofunktio

Painofunktio on vaihtoehtoinen laskentapa selvittää jännitysintensiiteettikerroin. Sen etu perustuu siihen, ettei jännitys jakaumaa tarvitse erikseen laskea tai mitata jokaiselle särön  $a$  kasvukerralle. IIW-suosituksessa kuitenkin mainitaan, ettei funktio kaikissa tapauksissa välttämättä anna oikeita tuloksia. Tuloksien parantamiseksi suositellaan numeerista integrointia (Hobbacher 2016, s. 32). Painofunktiota voidaan soveltaa kaksidimensioisille malleille. Painofunktio vaatii jännitys jakauman (liite 2) selvittämistä esim. FEA-mallista. Jännitys jakauma selvitetään ehyestä kappaleesta. Painofunktiolla jännitysintensiiteettikerroin  $K(a)$  särön pituuden suhteen lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$K(a) = \int_0^a \sigma(x) * h(a, x) dx \quad (14)$$

missä  $\sigma(x)$  on FE-mallista mitattu jännitys jakauma ja  $h(a, x)$  mallin geometrian ja särön sijainnin ja muodon huomioon ottava termi.

Tässä työssä painofunktiolaskelmissa käytettiin IIW-suosituksen (Hobbacher 2016, s. 125) mukaista menetelmää. Tätä työtä vastaavasta painofunktion käyttöä on sovellettu myös muissa tutkimuksissa (Pöllänen 2019, s. 61-62).

### 2.14.1 Painofunktiomenetelmä IIW-suosituksen mukaan

Painofunktiomenetelmä 1 on kuvattu IIW-suosituksessa (Hobbacher, 2016, s. 125). Kaavaa sovellettiin niin, että vain normaalijännitys jakauma otettiin huomioon. Tässä menetelmässä jännitysintensiiteettikerroin  $K(a)$  särön pituuden  $a$  suhteen laskettiin myös yhtälöllä 14:

$$K(a) = \int_0^a \sigma(x) * M_a(a, x) dx$$

$$M_a(a, x) = \left[ \frac{2}{\sqrt{2 * \pi * (x-a)}} \right] + M_{1a}(a) * (1 - x/a)^{\frac{1}{2}} + M_{2a}(a) * \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_{3a}(a) * (1 - x/a)^{3/2} \quad (15a)$$

$$A_0 = 0,456128 - 0,114206 * \left(\frac{a}{t}\right) + 0,046523 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (15b)$$

$$A_1 = 3,022 - 10,8679 * \left(\frac{a}{t}\right) + 14,94 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 6,857 * \left(\frac{a}{t}\right)^3 \quad (15c)$$

$$A_2 = -2,28655 + 7,88771 * \left(\frac{a}{t}\right) - 11,0675 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 5,16354 * \left(\frac{a}{t}\right)^3 \quad (15d)$$

$$B_0 = 1,1019 - 0,019863 * \left(\frac{a}{t}\right) + 0,043588 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (15e)$$

$$B_1 = 4,32489 - 14,9372 * \left(\frac{a}{t}\right) + 19,4389 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 8,32318 * \left(\frac{a}{t}\right)^3 \quad (15f)$$

$$B_2 = -3,03329 + 9,96083 * \left(\frac{a}{t}\right) - 12,582 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 5,3462 * \left(\frac{a}{t}\right)^3 \quad (15g)$$

$$Q = 1 + 1,464 * \left(\frac{a}{t}\right)^{1,65} \quad (15h)$$

$$Y_0(a) = B_0 + B_1 * \left(\frac{a}{t}\right) + B_2 * \left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (15i)$$

$$Y_1(a) = A_0 + A_1 * \left(\frac{a}{t}\right)^2 + A_2 * \left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (15j)$$

$$M_{1a}(a) = 3,1415 * \frac{(4*Y_0(a) - 6*Y_1(a))}{\sqrt{2*Q}} + \frac{24}{5} \quad (15k)$$

$$M_{2a}(a) = 3 \quad (15l)$$

$$M_{3a}(a) = 2 * \left(3,1415 * \frac{3,1415*Y_0(a)}{\sqrt{2*Q}} - M_{1a}(a) - 4\right) \quad (15m)$$

Seuraavassa alaluvussa käsitellään painofunktiomenetelmää suorakaiteen muotoiselle kappaleelle, jonka yhdelle sivulle on mallinnettu särö.

Seuraavassa luvussa käydään läpi rakenneyksityiskohdan valintaa Artic X54-tyyppin raitiovaunun A-korimoduulin lattiarakenteesta.

### 3. Korirakenteen yksityiskohdan valinta murtumismekaaniseen tarkasteluun

Tässä luvussa kuvataan alkuvalmistelut, joilla saatiin luotua murtumismekaanisen tarkastelun lähtökohdat. Luvun alussa perehdytään STT:n tekemiin lujuuslaskelmiin sekä kulun aikaisiin jännitysten mittauskokeen (myöhemmin koe C27) koeraporttiin. Tätä materiaalia käydään läpi vain niiltä osin, kuin se on tämä työn kannalta olennaista. Luvun loppuosassa esitellään korirakenteesta tehty alimalli, jolla pystyttiin suorittamaan särönkasvun tarkastelu.

#### 3.1 Artic X54-raitiovaunutyyppin väsymiskestävyyden arviointi

Tässä alaluvussa ja sen alaluvuissa käydään lyhyesti läpi Artic X54- tyyppin raitiovaunun korirakenteen väsymiskestävyyden laskentaan käytetyt lähtötiedot. Aluksi on listattu standardit ja suositukset, joita käytettiin. Ensimmäisessä alaluvussa esitetään jatkossa käytettävä koordinaatisto. Toisessa alaluvussa käydään läpi tässä työssä tarkasteltavan rakenneyksityiskohdan hitsiliitokselle annettuja parametreja.

Artic X54:n – vaunun korirakenteen väsymiskestävyyden arviointi on tehty seuraavien standardien ja ohjeistuksia noudattaen:

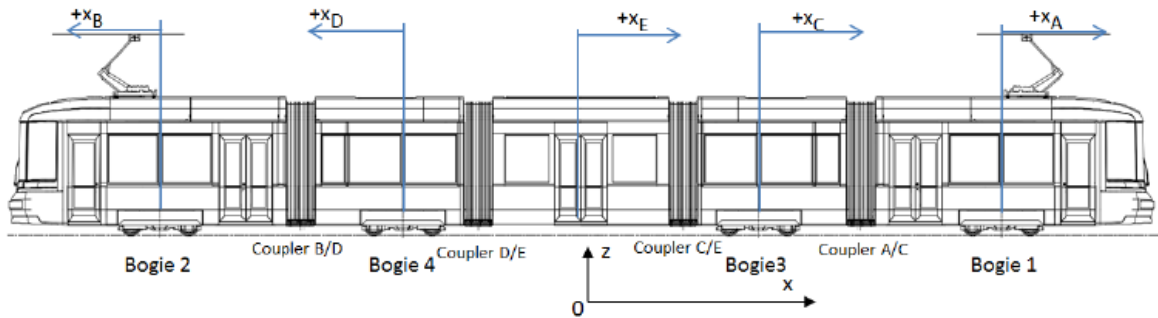
1. EN 12663-1: Railway applications. Structural requirements of railway vehicle bodies. Part 1: Locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons).
2. IIW: Recommendations for Fatigue design of welded joints and components. IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV – 1440-13.

3. EN 1993-1-9 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen.
4. EN 13749 Railway applications – Wheelsets and bogies – Method of specifying the structural requirements of bogie frames.
5. EN1993-1-1: Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
6. EN 1993-1-5: Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet.

Artic X54:n korien lujuus on todennettu käyttäen elementtimenetelmää. Globaali laskentamalli on pääosin kuorimalli, joka käsittää kaikki koriin kohdistuvan kuorman kantavat rakenteet. Yksityiskohdista on generoitu alimalleja. Tässä työssä käytetään näitä alimalleja hyväksi generoitaessa tutkimukseen sopiva alimalli. Tässä työssä esitetään vaunun A-korin lujuuslaskentatietoa, jotka ovat tämän työn kannalta oleellisia. Koko lujuuslaskentatietoa ei ole katsottu tarpeelliseksi käydä läpi.

### 3.1.1 Koordinaatisto

Tämän työn tutkimuksessa käytetään koordinaatistoa, joka vastaa STT:n laatiman lujuuslaskentatietoa koordinaatistoa. Kyseinen koordinaatisto on esitetty kuvassa 9, jossa A- ja C-korimoduulien origot sijaitsevat telikeskiössä. Z-koordinaattipisteiden korkeudet ovat mitattu kirkon pinnasta.



Kuva 9. Laskennassa ja mallintamisessa käytetty koordinaatisto (Transtech 2017, s. 5)

Seuraavassa aluvuussa tarkastellaan STT:n lujuuslaskentatiedon väsymismitoituslaskennassa käytettyjä lähtöarvoja.

### 3.1.2 Väsymismitoituksen lähtöarvot

Tässä aluvuussa esitetään Artic X54-raitiovaunutyyppin korin väsymismitoituksessa käytettyjä arvoja. Kaikkia arvoja ei esitellä, vaan vain tämän työn tutkimuksen kannalta oleelliset.

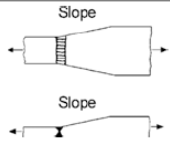
Lujuuslaskentaspesifikaation mukaan lujuuslaskennassa väsyttävissä kuormitustapauksissa käytettiin vaunun taarapainoa sekä matkustajakuormaa  $m_3$  (Transtech 2017, s. 22). Kuormanvaihtojen osalta käytettiin seuraavia HKL:n ja STT:n yhdessä sopimia arvoja ja standardiarvoja (SFS-EN 12663-1, s. 23):

- Artic X54-tyypin raitiovaunu suunniteltu käyttöikä: 40 vuotta
- Käyttötaajuus vuodessa: 365 vuorokautta
- Käyttöaika vuorokaudessa: 20 tuntia

- Kuormanvaihtojen ( $\Delta N$ ) määrä vuorokaudessa: 34 kuormanvaihtoa

Lisäksi IIW-suositusten mukaan erilaisille rakenneyksityiskohdille ja liitoksille on annettu väsytyluokkia. Niistä tämän työn kannalta oleellinen on seuraava (Hobbacher 2016, s. 45):

- Poikittainen päittäishitsi, NDT-tarkastettava, paksuuden ja leveyden siirtymäsuhde 1:5. FAT 80,  $\Delta\sigma_{sall} = 47$  MPa,  $10^7$  kuormitusykyllä (Kuva 10).

223		Transverse butt weld, NDT, with transition on thickness and width Slope 1:5 Slope 1:3 Slope 1:2	80	25	Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress Misalignment due to deliberate thickness step to be considered, see Sect. 3.8.2. Additional misalignment due to fabrication imperfection < 10 % of plate thickness
			71	22	
			63	20	

Kuva 10. IIW-suositus rakennekohtaan W1.1 liitostyypille (Hobbacher 2016, s. 45).

Väsymismitoituksessa käytettiin seuraavia kiihtyvyyssarvoja:

- Väsyttävä poikittaiskiihtyvyys (SFS-EN 12663-1 2015, s. 24):  $a_y: \pm 0,2g$
- Väsyttävä pitkittäiskiihtyvyys (SFS-EN 12663-1 2015, s. 23):  $a_x: \pm 0,15g$ , joka korotettiin arvoon  $0,18g$ .
- Väsyttävä pystykiihtyvyys (SFS-EN 12663-1 2015, s. 23):  $a_z: (1 \pm 0,15g * 1,2) = 1 \pm 0,18g$ . (Pystykiihtyvyyttä korotettiin 20% SFS-EN 12663-1 suosituksen mukaisesti, koska vaunulla ajo tapahtuu urakiskoilla).

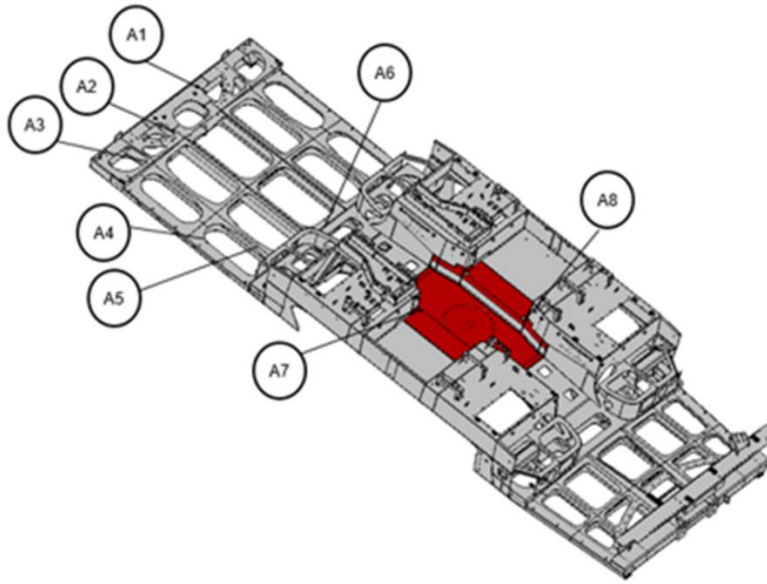
Seuraavassa alaluvussa käydään läpi, miten tutkimukseen valittiin rakenneyksityiskohta.

### 3.2 Rakenneyksityiskohdan määrittäminen

Tässä luvussa kuvataan rakenneyksityiskohdan valinta, jolle suoritettiin murtumismekaaniset tarkastelut.

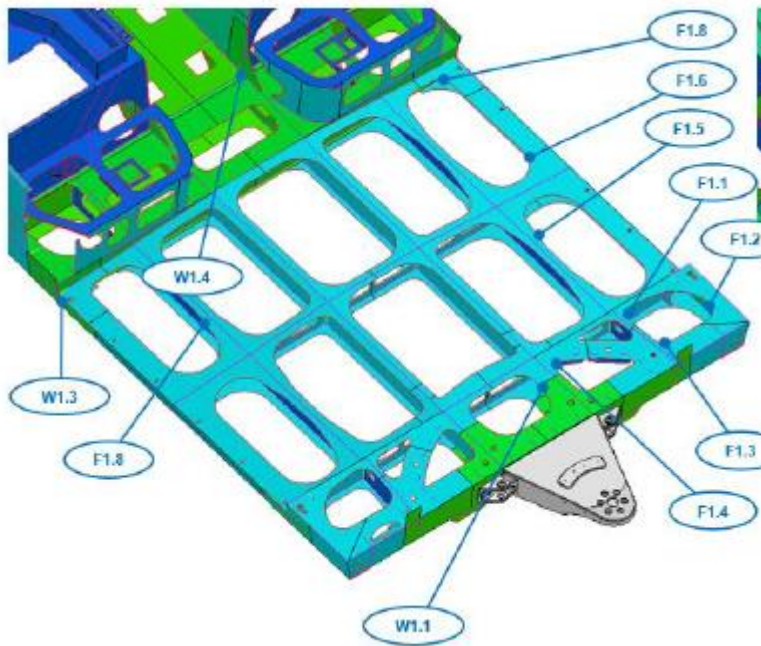
Artic X54- tyyppin raitiovaunun korirakenteessa oli tarjolla useita mielenkiintoisia kohtia. Kohta W1.1 kuitenkin valikoitui tarkastelukohteeksi sen sijainnin ja kriittisyyden perusteella. Tämä työ tarkastelee korin turvallisuuskriittisestä näkökulmasta ja työn tavoitteena oli tutkia, voiko vaunun korissa olla sellaisia riskikohteita, jotka voivat vaikuttaa turvalliseen vaunun operointiin 40 vuoden käyttöaikana. Työssä arvioitiin ennen laskelmia, että rakenneyksityiskohdassa W1.1 oleva, epästabiiilille rajalla kasvanut särö, voisi johtaa rakenteen pysyvään vaurioon. Yksityiskohdassa W1.1 tapahtuvan särön kasvu ja rakennevaurio synnyttävät voimien välittymiseen yhä pienimmille alueille korirakenteessa. Tällöin muualla rakenteessa sijaitseviin jännityskeskittymiin kohdistuu entistä suuremmat rasitukset. Tämän perusteella rakenteen rakenneyksityiskohta W1.1 arvioitiin kriittiseksi.

Kuva 11 esittää kokeessa C 27 käytettyjen venymäliuskojen paikkoja A-korin lattia rakenteessa. Tässä työssä tutkitaan rakenneyksityiskohtaa, jota mitattiin venymäliuskillalla A2. (Autio 2019, s. 3.)



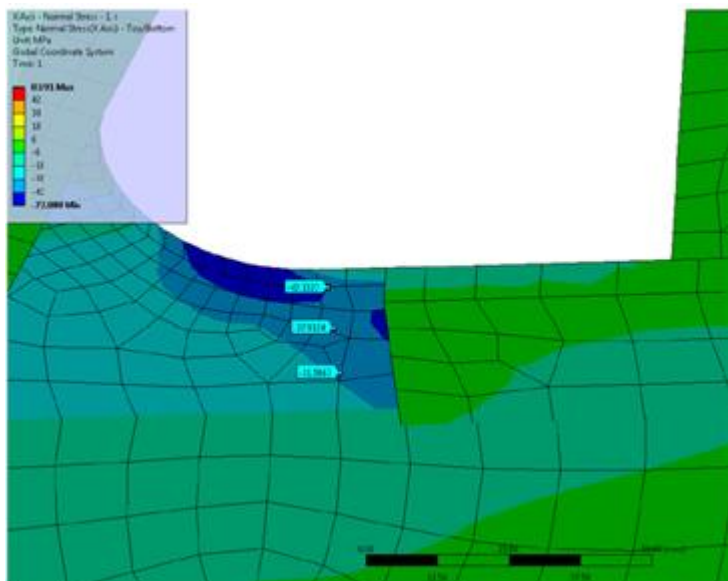
Kuva 11. Venymäliuskojen paikat A-korimoduulin lattiarakenteessa.

Kohta A2 (Kuva 11), joka vastaa myöhemmin kohtaa W1.1, on arvion mukaan hyvin keskeinen paikka. Rakenne on tasaluja hitsiliitos, joka on toteutettu molemmilta puolilta hitsattuna päittäishitsinä. Tätä teknistä yksityiskohtaa tarkasteltaessa lähemmin huomataan, että hitsisauman kohdalla materiaalin paksuus muuttuu 8 millimetristä 4 millimetriin. Ainepaksuuden oheneminen on toteutettu 1:5 viisteellä. Näiden geometrian muutosten johdosta IIW-suosituksista on kohdalle määritetty FAT 80- luokka ja yksityiskohdaksi 223. (Hobbacher 2016, s. 45.) Kohdan W1.1 otsapinta-alan mitat eivät muutu. Suurimmaksi sallituksi nimellisjännitykseksi on annettu 47 MPa.



Kuva 12. Rakenneyksityiskohtan W1.1 sijainti (Transtech 2018, s. 61).

STT:n tekemässä A-korin lujuuslaskennassa yksityiskohtalle W1.1 tehtiin lähempiä tarkasteluja. Lujuuslaskennassa väsyttävä kuorma oli x-suuntaista. Kuva 13 nähdään, että jännityskeskittymässä suurin vetojännitys sijoittui kappaleen reunaan (42 MPa) ja siitä jännitysarvo laskee hieman siirryttäessä kohti kappaleen keskustaa.



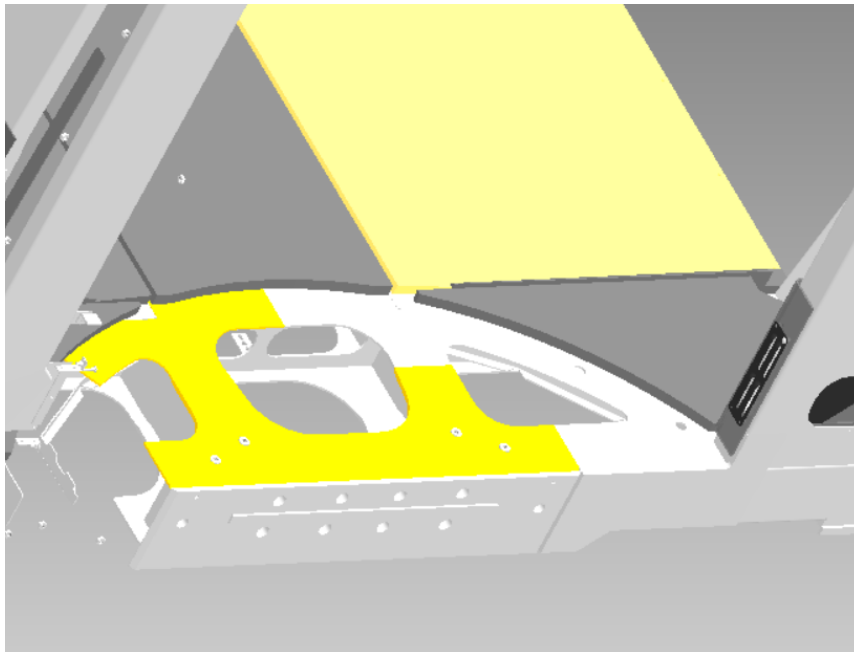
Kuva 13. Jännitysjakauma W1.1 läheisyydessä (Transtech 2018, s. 230).

Taulukko 1 nähdään rakenneyksityiskohtaan W1.1 hitsisaumalle annetut vaatimukset ja lujuuslaskennan perusteella saatu jännitysvaihtelualue. Laskennan perusteella saatu tulos (42 MPa) jäi alle IIW-suosituksen mukaista arvoa (47 MPa). Taulukko 2. Rakenneyksityiskohtaan W1.1 hitsausaumalle annetut vaatimukset ja lujuuslaskennan tulokset on nähtävillä.

Taulukko 2. Rakenneyksityiskohtaan W1.1 hitsausaumalle annetut vaatimukset ja lujuuslaskennan tulokset

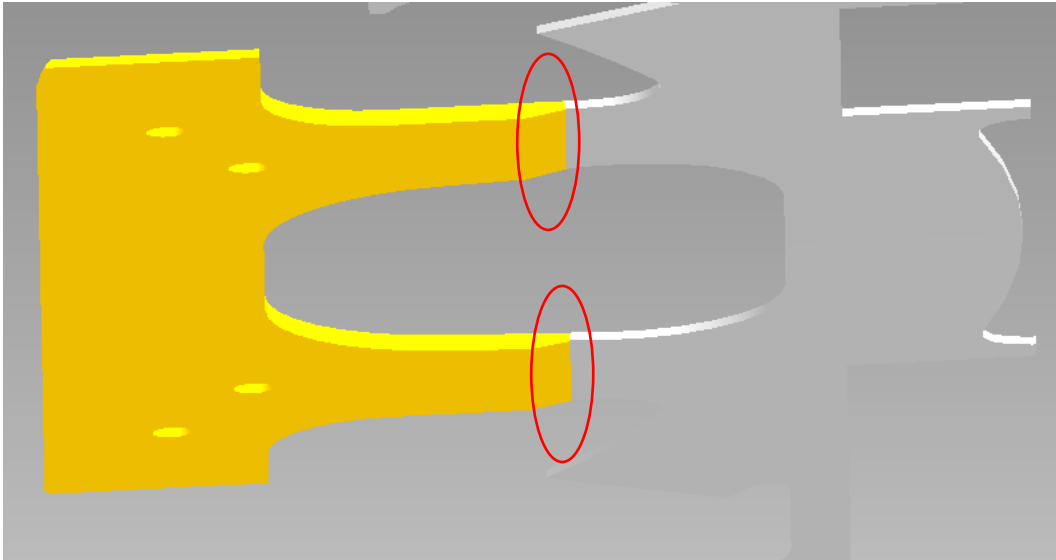
Kohta	Kuvaus	Hitsintyyppi	Hitsinsuunta	Kuormitustapaus	FAT-luokka	sallittu jännitysvaihtelu (IIW 223)	Saatu jännitysvaihtelualue
W1.1	Ylälaippa, poikittainen päittäishitsi	BW/BS	Y	FATX	FAT80 (223)	47 MPa	42 MPa

Seuraava Kuva 14 esittää Navisworks-ohjelmasta poimitun rakenneyksityiskohtaan W1.1 rakenteet.



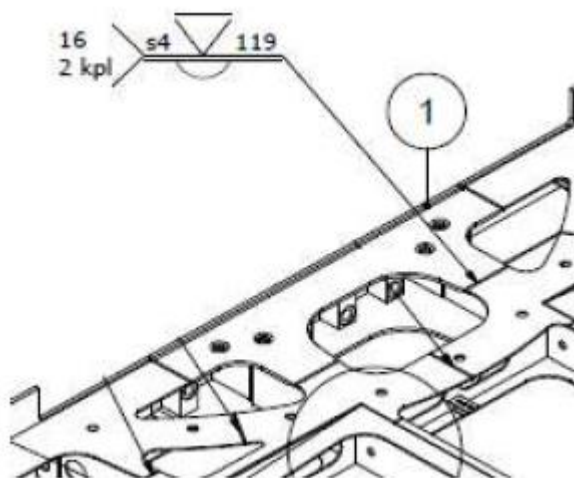
Kuva 14. Lattiarakenteen teräslevyt, jotka ovat hitsattu yhteen. Rakenneyksityiskohta W1.1. Kuva tehty Navisworks-ohjelmalla.

Kuva 15 esittää Navisworks-ohjelmassa rakenneyksityiskohdan W1.1. hitsiliitoksia (ympyröity punaisella).



Kuva 15. W1.1-kohdan lattia rakenne pelkistettynä. Kuva tehty Navisworks-ohjelmalla.

Rakenneyksityiskohdassa W1.1 oleva hitsiliitos oli tasaluja (Kuva 16). Tasalujat liitokset suunnitellaan lähtökohtaisesti tasalujiksi ympäröivän rakenteen heikoimman kohdan mukaan (Lepola & Ylikangas 2019, s. 363). Kyseisessä kohdassa on päittäishitsi ja muodoltaan kyseessä on V-hitsiliitos. Merkinnän mukaan tasahitsi, joka on hitsattu juuritukea vasten. Hitsi on jatkuva. Hitsaussyvyys on 4 mm, mikä tarkoittaa samalla läpihitsattua liitos.



Kuva 16. Rakennesyksityiskohdan W1.1 hitsin merkinnät.

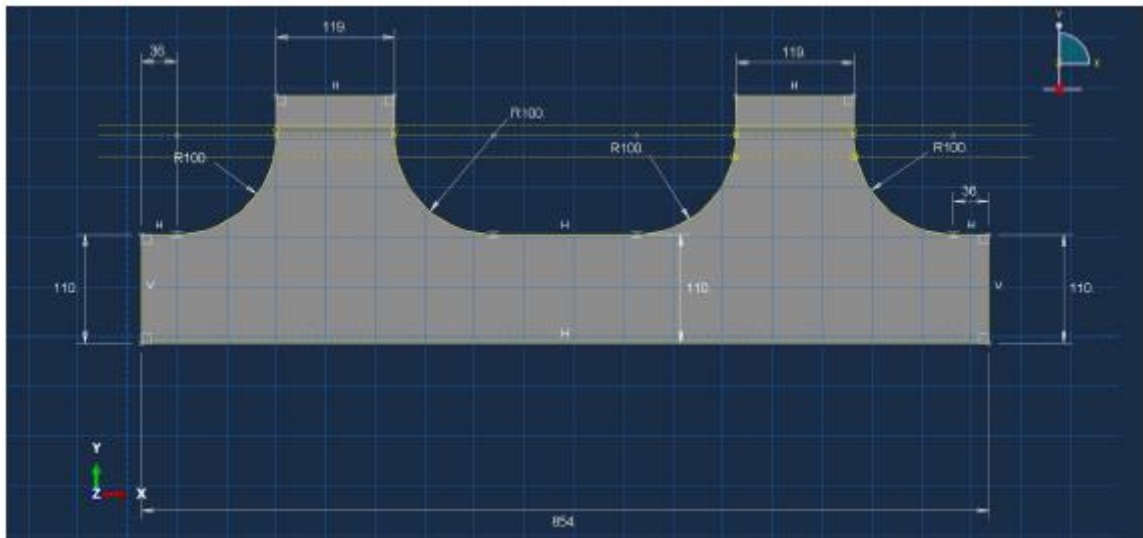
Seuraavassa alaluvussa käsitellään alimallien muodostamista.

### 3.3. Alimallien muodostaminen

Tässä kappaleessa selostetaan lyhyesti Artic X54- tyypin raitiovaunun A-korimoduulin lattiarakenteen osista muodostettuja alimalleja A ja B, joilla suoritettiin murtumismekaaniset tarkastelut.

#### 3.3.1 Alimalli A

Alimalli A tehtiin Abaqus-ohjelmalla (Kuva 17). Työssä oli alun perin tarkoitus tehdä särön kasvun tarkastelu tällä ohjelmalla, mutta työn edetessä havaittiin, että Abaqus-ohjelman opiskelijaversiossa oli elementtien määrä rajoitettu 1000. Tästä syystä päätettiin muodostaa alimalli b, joka soveltui paremmin Franc2D-ohjelmalla tehtävään analyysiin. Alimalli A kuitenkin tehtiin ja sen ajateltiin olevan työn raportoinnin kannalta hyvä jättää esille. Alimalli A tehtiin Navisworks-ohjelmasta saatujen mittojen perusteella.

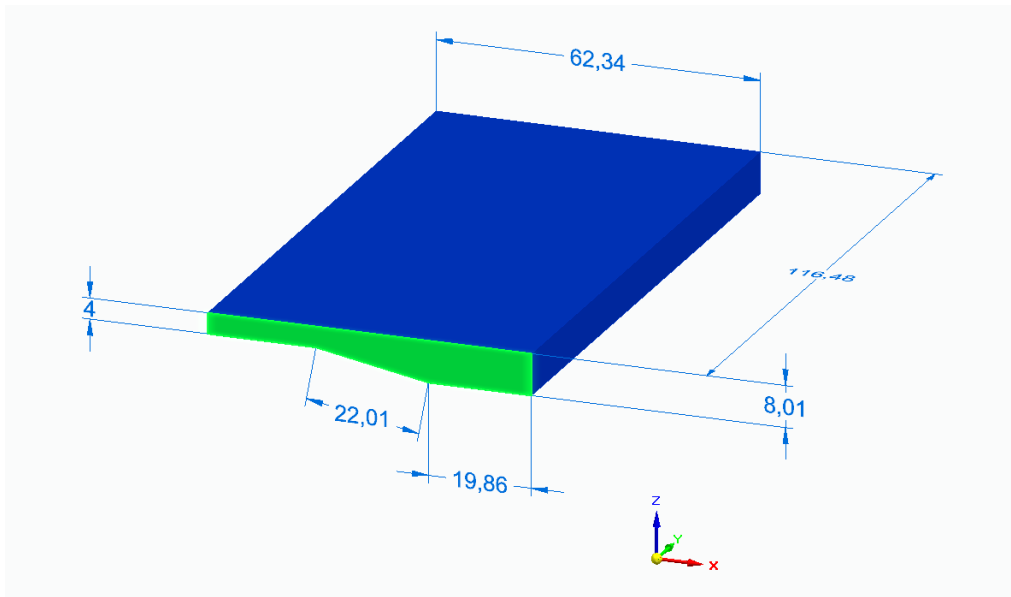


Kuva 17. Alilammin A mitat.

Seuraavassa alaluvussa käsitellään alimallin B muodostamista.

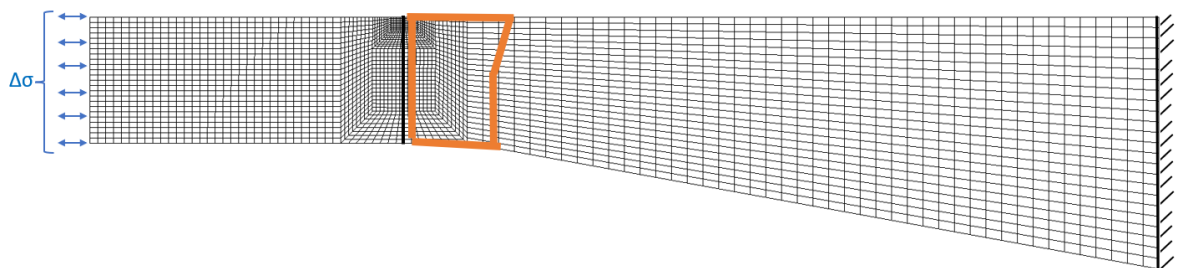
### 3.3.2 Alimalli B

Tässä luvussa kuvataan elementtimenetelmällä luotu alimalli B. Alimallin avulla tehtiin sä-  
rön kasvutarkastelu. Lisäksi alimallia käytettiin apuna jännitys jakauman määrittämisessä  
painofunktiolaskelmiin. Kuva 18 esittää Solidedge-ohjelmalla tehtyä alimallia B. Kuvassa  
näkyvät mitat ja vihreällä korostettu alue, joka valittiin 2D-mallin tarkastelutasoksi.



Kuva 18. Alimalli B mittoineen.

Alimalli B oli kaksiulotteinen projektio aikaisemmin kuvatussta Solidedge-ohjelmalla tehdystä alimallista. Franc2D-ohjelmalla ei ollut mahdollista luoda verkotusta, joten esikäsittelijänä käytettiin Casca-ohjelmaa, joka niin ikään oli saatavilla vapaasti verkosta. Casca-ohjelman käyttöön päädyttiin, koska sillä tehdyn tiedoston avaaminen Franc2D-ohjelmalla oli vaivatonta. Taulukko 3 selviää Franc2D-ohjelmaan syötetyt reunaehdot ja materiaalitiedot. Vastaavasti reunaehto- ja materiaali-asetointi alimalliin B on esitetty Kuva 19.



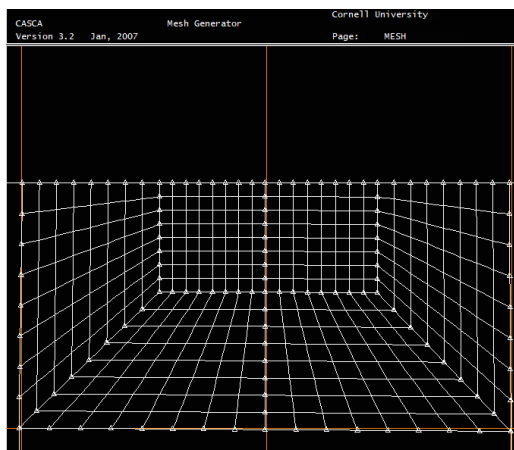
Kuva 19. CASCA-ohjelmalla tehdyn alimallin yleiskuvaus ja reunaehdot sekä valmiin hitsisauma sijainti rakenteessa (oranssilla).

Kuormitukseksi asetettiin ekvivalentti jännitysvaihtelualue 9 MPa, tämä jännitys saatiin koeken C 27 kestoikälaskelmista (Taulukko 6).

Taulukko 3. FRANC2D-ohjelmalle syötetyt materiaalitiedot ja reunaehdot.

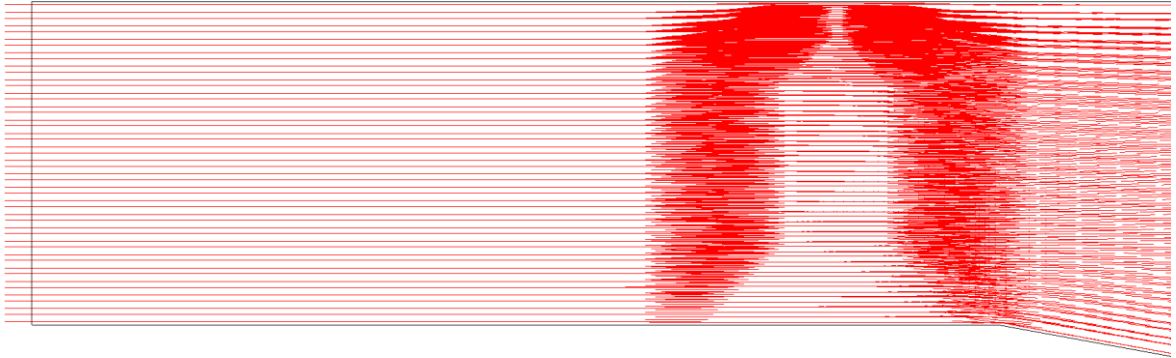
Nimike	suuruus
Kimmomoduuli Y	210 000 MPa
Poissonin vakio $\nu$	0.30
Kappaleen leveys (x-suunta)	119 mm
Jännitysvaihtelualue ( $\Delta\sigma$ )	9 MPa
kiinnitys	x- ja y-suunta

Kuva 20 esittää Casca-ohjelmalla tehtyä verkotusta särön ydintymisen kohdalla. Siitä nähdään, että yhden elementin koko on 0,0625 millimetriä. Tässä työssä suunnitellun alkusärön koko oli suunnilleen 0,05 millimetriä. Verkotuksen tiheys riitti juuri näin pienen särön tutkimiseen. Särön kasvuinkrementti tutkimuksessa on 0,05 mm, joka sopi myös verkotuksen kokoon.



Kuva 20. CASCA-ohjelmalla tehdyn verkon tiheys. Pienin elementtikoko 0,0625 mm

Seuraavasta Kuva 21 nähdään pääjännityksen suunta alimallissa B. Pääjännitys on kohtisuorassa alkusäröön nähden, joten särön avautuminen on laskettavissa moodin I mukaan.

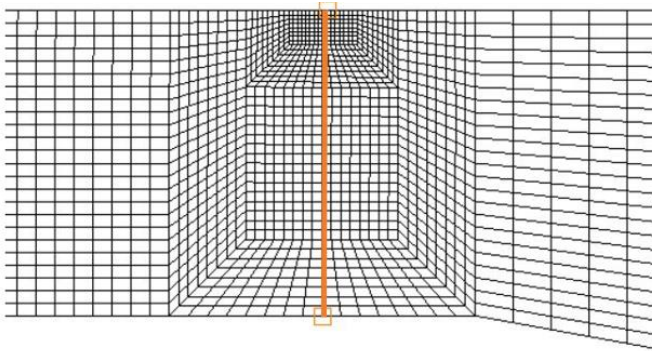


Kuva 21. alimallin B pääjännityksen suunta

Alimalli B saatiin luotua ja valmistelut näyttivät siltä, että särön virtuaalinen kasvattaminen onnistuu. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi työn tulokset.

### 3.4 Jännitys jakauman määrittäminen painofunktiota varten

Painofunktiota varten tarvittiin jännitys jakauma, joka määritettiin Franc2D-ohjelmassa alimallista B. Jännitys jakauma otettiin ehjästä kappaleesta, eli edes suunniteltua särömäistä alkuvirhettä ei alimallin b oltu määritelty, vaan ohjelmalle oli syötetty vain reunaehdot ja materiaalitiedot (Taulukko 3). Seuraavassa Kuva 22 on esitetty jännitys jakauman mittaus. Jännitys jakauma mitattiin Franc2D-ohjelmalla hitsisauman kärjen tasalta kappaleen poikkileikkauksen läpi, koska särön ennustettiin kulkevan asetetulla kuormituksella jakauman suuntaisesti.



Kuva 22. Jännitys jakauma mitattiin hitsiliitoksen kärjen tasalta kappaleen paksuuden läpi.

Seuraavassa luvussassa käydään läpi työn tulokset ja vertaillaan Franc2D-ohjelmalla ja painofunktiolla saatuja tuloksia STT:n lujuuslaskennan sekä kokeen C27 tuloksiin.

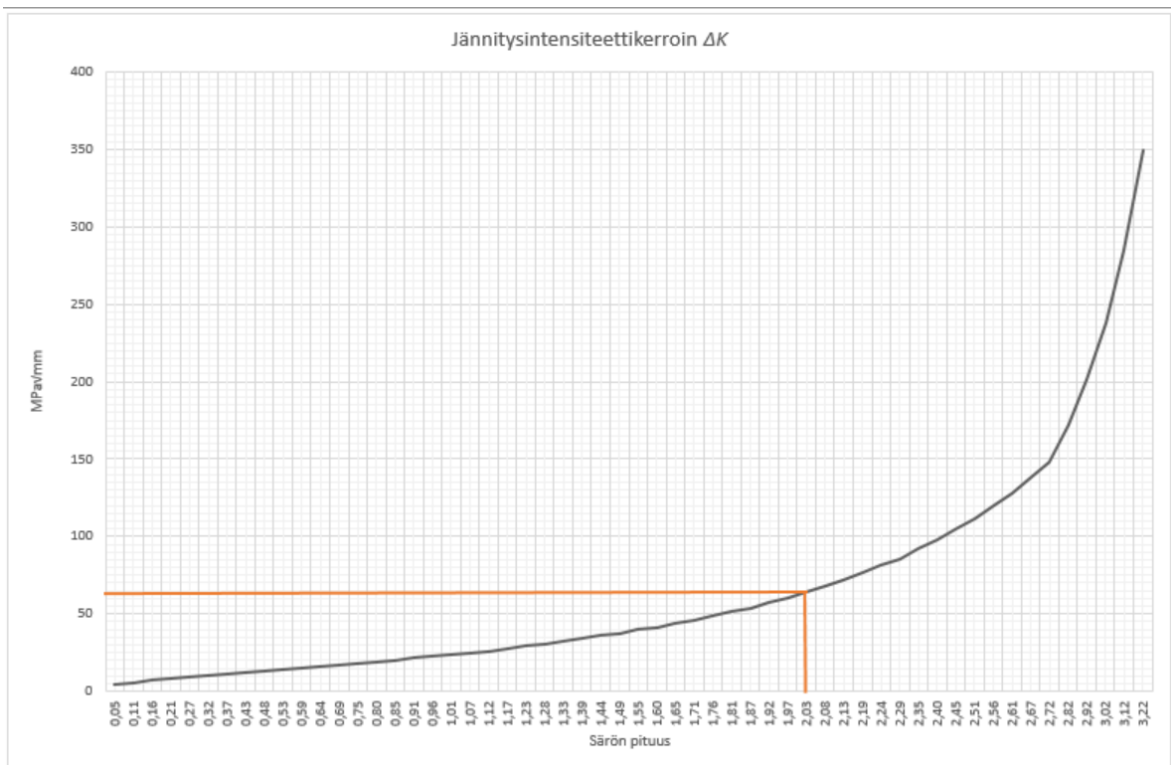
## 4. Tulokset

Tässä kappaleessa käydään läpi työn tulokset. Tehtävänä oli määrittää rakennekohdan W1.1 kestoikä, kun siinä olevan hitsin läheisyyteen on oletettu hyvin pieni särömainen virhe. Tälle virheelle annettiin syvyysarvoksi 0,05 mm. Kestoikälaskelmat suoritettiin käyttämällä kahta eri menetelmää: Franc2D-ohjelmassa tehtyä virtuaalista särönkasvatusta ja painofunktio-menetelmää.

### 4.1 Jännitysintensiiteetikertoimen vaihtelualueet eri laskentamenetelmillä

Tässä kappaleessa esitellään jännitysintensiiteetikertoimen vaihtelualueen  $\Delta K_I$  laskentatuloksia. Kaikki tulokset on laskettu särön avautumismoodilla I.

Franc2D -ohjelmalla tehdyt kokeet valittiin ns. referenssituloksiksi. Tähän oli syynä ohjelman keskeisyys työn tulosten kannalta, sillä painofunktio-laskelmiin tarvittava jännitysja-kauma  $\Delta\sigma(x)$  mitattiin ohjelman avulla. Franc2D -ohjelmalla lasketun jännitysintensiiteetikertoimen vaihtelualueen  $\Delta K_I$  tulokset ovat esitetty Kuva 23. Kerrointa laskettiin aina särön pituudelle 3,2 mm, mikä oli 80 % kappaleen paksuudesta (4 mm).



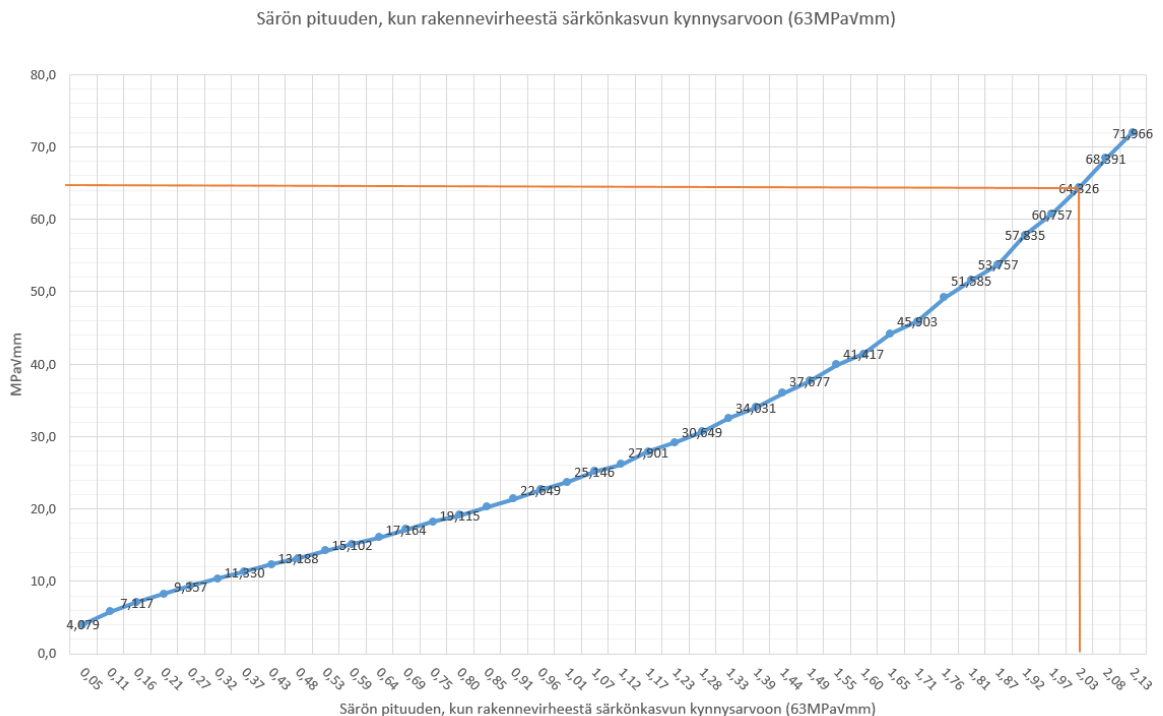
Kuva 23. Franc2D-ohjelmalla saatu jännitysintensiiteettikerroin suhteessa särön kokoon.

Franc2D-ohjelmalla ja painofunktio-menetelmällä saatiin jännitysintensiiteettikerroimen vaihtelualueen  $\Delta K_I$  arvot kohtaa, jossa se ylitti teräkselle annetun särönkasvun alkamisen kynnyksarvon  $\Delta K_{th}$  (Hobbacher, 2016, s. 8). Tulokset ovat esitetty Taulukko 4.

Taulukko 4. Särön pituuden arvo intensiteettikertoimen kynnsarvon ylityksen kohdalla.

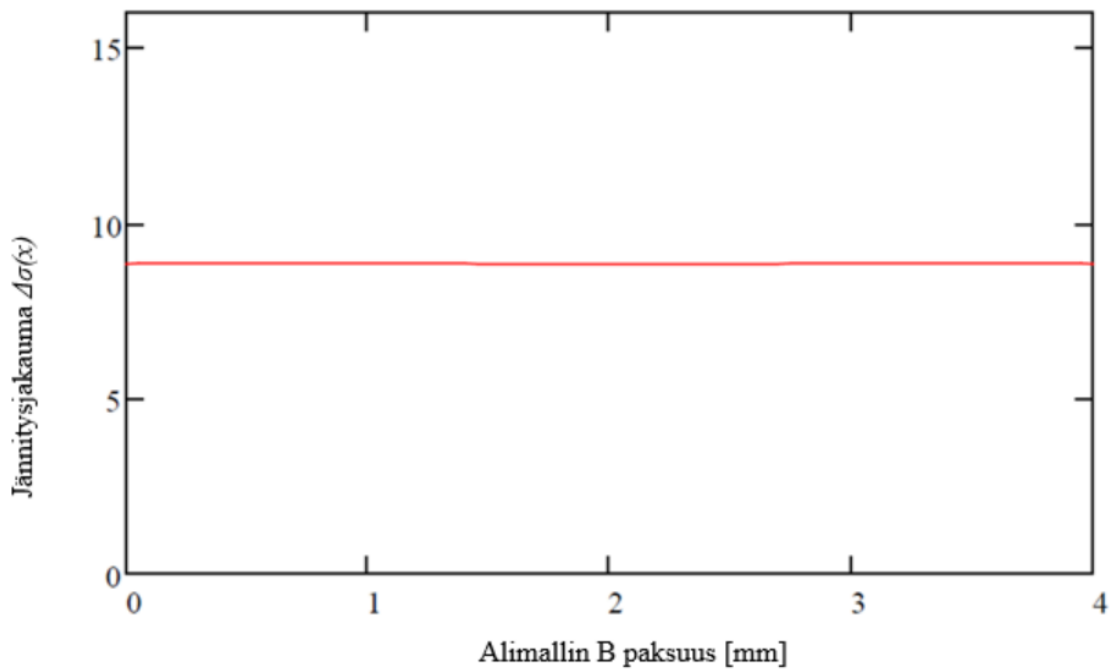
Laskentametodi	särön pituus $a$ , kun $\Delta K_I \geq \Delta K_{th}$ [mm]	$\Delta K_I (a_{th})$ [MPa $\sqrt{\text{mm}}$ ]
FRANC2D	2,03 mm	64,33
Painofunktio 1	Ei ei tiedossa	Ei saavutettu

Kuva 9 Kuva 24 esittää kohtaa, jossa Franc2D-ohjelmalla laskettu jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualue  $\Delta K_I$  ylitti teräkselle annetun särönkasvun alkamisen kynnsarvon  $\Delta K_{Ith}$  (Hobbacher 2016, s. 8).



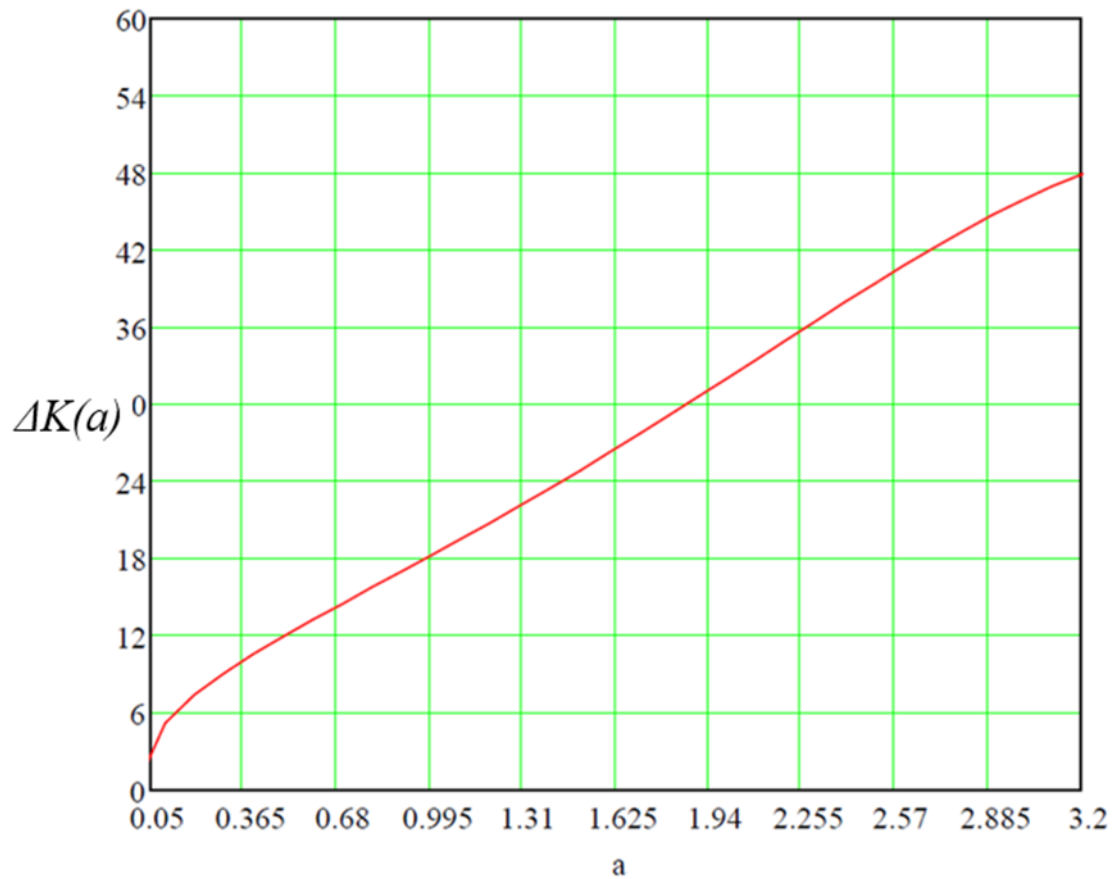
Kuva 24. Jännitysintensiteettikertoimen kynnsarvon ylityskohta.

Kuva 25 esittää jännitys jakaumaa  $\Delta\sigma(x)$  alimallin B paksuuden yli. Jännitys jakauma määritettiin Franc2D -ohjelmalla, säröpaksuuden ollessa 0,05 mm. Jännitys jakauma on käytännössä koko matkalta 9 MPa, sillä kappaleeseen vaikutti vain kalvojännitys ja lisäksi hitsiliitoksen kupu oli määrittelyn mukaan hiottu pois (Hobbacher 2016, s. 45) loivivaikutuksen poistamiseksi. Lisäksi rakenteen geometria ei aiheuttanut rakenteellista jännityskeskittymää.



Kuva 25. Painofunktiolaskelmissa jännitys jakauma. Mitattu Franc2D-ohjelmalla.

Painofunktiolla laskettaessa jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualue  $\Delta K_I$  poikkesi Franc2D-ohjelman tuloksesta. Kuva 26 osoittaa, että painofunktio-menetelmällä saadun tuloksen mukaan kynnyisarvo  $\Delta K_{I_{th}}$  ei ylittänyt. Lisäksi kuvaajan muoto poikkeaa Franc2D-ohjelmalla saadusta jännitysintensiteettikertoimen kuvaajasta. Jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualueen  $\Delta K_I$  laskennassa painofunktiomenetelmällä särön syvyyden aja pituuden suhde  $a:c$  otettiin huomioon. Franc2D-ohjelmassa tätä suhdetta ei huomioitu. Kuva 26 pystyakselilla on jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualueen arvot, vaaka-akselilla särön pituus  $a$ .



Kuva 26. Jännitysintensiiteettikertoimen jakauma laskettuna painofunktiolla

Seuraavassa aluvuossa esitetään rakenneyksityiskohtaan W1.1 syntyneet jännitykset kokeen C27 aikana.

#### 4.2 Rakenneyksityiskohdan W1.1 esiintyvät jännitykset kokeesta C27 saaduilla tuloksilla

Artic X54 -vaunulle suoritetussa kokeessa C27 mitattiin kulunaikaisia jännityksiä. Tuloksena saatiin jännitysvaihtelut viideltä eri raitiovaunureitiltä. Ekvivalentti jännitysheilahdus  $\Delta\sigma_{ekv}$  laskettiin rainflow-analyysin tuloksista. Rakenneyksityiskohdan W1.1 osalta kokeessa C27 pienin mitattu jännitysheilahdus oli 6 MPa ja suurin 69 MPa. Taulukko 5 esittää rainflow -analyysin tulokset. Lopussa ekvivalentti jännitysheilahdus  $\Delta\sigma_{ekv}$ .

Taulukko 5. Kokeen C27 mittau tulokset auki laskettuina

i	$\Delta\sigma$ [Mpa]	$n_i$	$\Delta\sigma^3 * n_i$	$\Delta\sigma^3 * n_i / \sum \Delta\sigma^3 * n_i$
1	69	0	0	0,000
2	66	0	0	0,000
3	63	0	0	0,000
4	60	0	0	0,000
5	57	0	0	0,000
6	54	0	0	0,000
7	51	1	132651	0,003
8	48	2	221184	0,005
9	45	1	91125	0,002
10	42	3	222264	0,006
11	39	7	415233	0,010
12	36	4	186624	0,005
13	33	29	1042173	0,026
14	30	39	1053000	0,026
15	27	103	2027349	0,050
16	24	243	3359232	0,083
17	21	493	4565673	0,113
18	18	661	3854952	0,095
19	15	1248	4212000	0,104
20	12	2449	4231872	0,105
21	9	6612	4820148	0,119
22	6	46169	9972504	0,247
		58064	40407984	1
$\Delta\sigma_{ekv}$ [MPa]	<b>9</b>			

Ekvivalentiksi jännitysheilahdukseksi saatiin  $\Delta\sigma_{ekv}$  on 9 MPa. Tätä lukua käytettiin seuraavassa alaluvussa esitettyjen särön kasvuajan laskelmissa rakenteeseen vaikuttavana keskimääräisenä jännitysheilahduksena.

#### 4.3 Rakennesyksityiskohdassa W1.1 väsymiskestävyys murtumismekaniikkaa soveltaen

Tässä kappaleessa esitellään kestoikälaskemat rakennesyksityiskohdalle W1.1, alimallin b avulla laskettuna. Kestoikälaskelmien keskeinen tekijä on jännitysintensiiteettikertoimen vaihtelualue, joissa oli eroja Franc2D-ohjelman ja painofunktionlaskelman välillä. Seuraavissa Taulukko 6, Taulukko 7, Taulukko 8 vertaillaan laskelmia eri särön pituuksilla. Laskelmien askellus eteni niin, että ensin on vertailtu särönkasvu kestoikää tilanteesta  $a_0 = 0,05$  mm, tilanteeseen  $a_f = 3,2$  mm. Tämän jälkeen on vertailtu kestoikää paloittain niin, että ensin särö ydintyy rakennevirheestä  $a_0 = 0,05$  mm ja kasvaa (stabiili kasvu)  $a_i = 2,03$  millimetriin. Seuraavassa askeleessa särön kasvu tapahtuu  $a_i = 2,03$  millimetristä särönkokoon  $a_f = 3,2$  mm, joka oli 80% kappaleen paksuudesta.

Taulukko 6. Särön kasvu  $a_0 = 0,05$  mm  $\rightarrow a_{cr} = 3,2$  mm

Kestoikä			
Hitsin kasvu	Franck2D	Painofunktio	Yksikkö
$a_0 = 0,05$ mm	4,032E+09	5,419E+09	Kuormitusyksiä
$a_f = 3,2$ mm			
N/vuotta	16245	21833	Vuotta

Taulukko 7. Särön kasvu  $a_0 = 0,05$  mm  $\rightarrow a_i = 2,03$  mm

Kestoikä			
Hitsin kestoikä	Franck2D	Painofunktio	Yksikkö
$a_0 = 0,05$ mm	4,028E+09	5,357E+09	Kuormitusyksiä
$a_i = 2,03$ mm			
N/vuotta	16229	21583	Vuotta

Taulukko 8. Särön kasvu  $a_i = 2,03 \text{ mm} \rightarrow a_f = 3,2 \text{ mm}$ 

	Kestoikä		
Hitsin kestoikä	Franck2D	Painofunktio	Yksikkö
$a_i = 2,03 \text{ mm}$	3,497E+06	6,241E+07	Kuormitusyksiä
$a_f = 3,2 \text{ mm}$			
N/vuotta	14	251	Vuotta

Yhteenvedona todetaan, että särön kasvuaika näyttää teoreettisesti olevan moninkertainen, verrattuna Artic X54- tyyppin raitiovaunujen suunniteltuun käyttöaikaan (40 vuotta). Tulos siis viittaa siihen, että rakenneyksityiskohta W1.1 on geometrialtaan hyvin suunniteltu.

Seuraavassa alaluvussa analysoidaan äsken esitettyjä koetuloksia.

#### 4.4 Väsymiskestävyys Rakenteellisen Hot Spot-jännitys –menetelmällä ja ajokokeesta C27

STT suoritti lujuuslaskelmissaan yksityiskohtaisemmat tarkastelut rakenneyksityiskohdalle W1.1. HS-menetelmällä laskettiin W1.1 –kohdan ekvivalentiksi jännitysvaihtelualueeksi  $\Delta\sigma_{ekv}$  42 MPa. Kun tätä verrattiin IIW-suositusten (Hobbacher 2016, s. 45) mukaiseen 47 MPa, saatiin varmuuskertoimeksi 1,12. HS-menetelmällä väsymiskestoksi saatiin kaavalla 13 ja 14. Laskenta tulos oli 45 vuotta. Tämä luku on yli Artic X5- tyyppi vaunusarjalle suunnitellun käyttöajan (40 vuotta).

STT:n ja HKL:n yhdessä suorittamassa kokeessa C27 oli rakenneyksityiskohtaan W1.1 asennettu venymäliuska SGA02 (VTT 2021, s. 44). Kokeen tuloksen analysoitiin rainflow-menetelmällä ja rakenneyksityiskohdan W1.1 väsymiskestoksi saatiin 253 vuotta (Trans-tech 2021, s. 6).

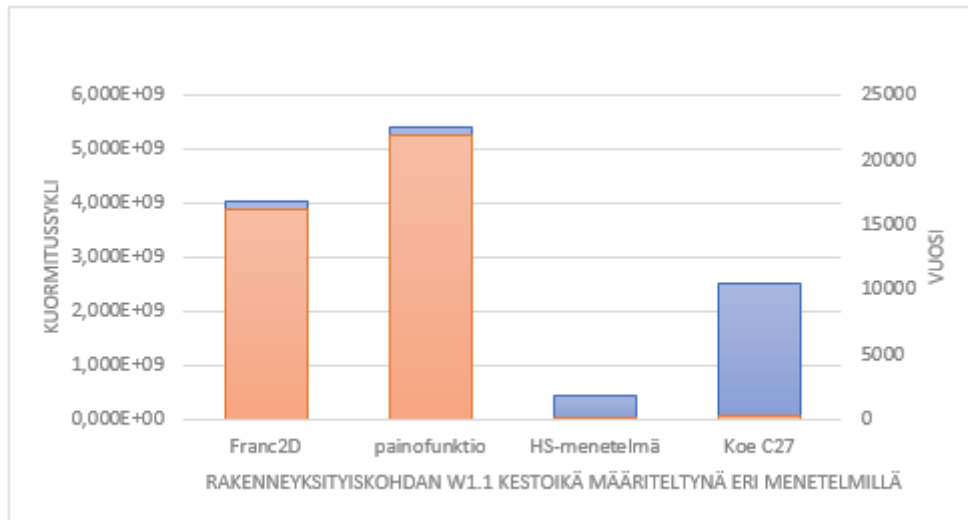
## 5 Analyysit tutkimuksesta

Tässä luvussa esitetään analyysi laskentatuloksista. Särön kasvua simuloitiin Franc2D-ohjelmalla ja analytyttiset laskelmat tehtiin käyttäen painofunktio-menetelmää. Näiden kahden metodin tuloksia verrataan keskenään. Lisäksi tämän työn laskelmia verrataan STT:n lujuuslaskentatuloksiin ja kokeen C27 tuloksiin.

### 5.1 Rakenneyksityiskohdan W1.1 väsymiskestoisän murtumismekaniikan laskentatulosten vertailu

Tässä kappaleessa verrataan Franc2D-ohjelman antamien tulosten ja painofunktioimenetelmällä saatujen tuloksia.

Taulukko 6 ,Taulukko 7 Taulukko 8 esitettiin Franc2D -ohjelman ja painofunktiolla laskettujen jännitysintensiiteettikestoimen  $\Delta K_I$  vaihtelualueiden välillä oli melko suuria eroja. Franc2d-ohjelmalla saatujen tulosten mukaan särömäinen alkuvirhe ei pääsisi ydintymään Artic X54-raatiovaunun käyttöön aikana. Samaan tulokseen päädyttiin myös painofunktioimenetelmällä 1 laskettaessa. Franc2D-ohjelmalla laskettujen  $\Delta K_I$  tulokset näyttivät muuhin tutkimuksiin (Ahola et al. 2021 ja Pöllänen 2019) verrattaessa tyypilliset arvot, särön pituuden suhteen. Painofunktiolla tehdyn väsymiskestoisän määrittämisessä käytettiin Franc2D-ohjelmalla hitsiliitoksen kärjestä mitattuun jännitys jakaumaa. Painofunktion antama jännitysintensiiteettikerroin ei kehittynyt aivan yhtä hyvin, kuin Franc2D-ohjelmalla.



Kuva 27. Rakenneyksityiskohdan W1.1 kestojen määritykset eri menetelmillä. Vasen pystyakseli kuvaa kuormitussyklejä ja oikea väsymiskestävyyttä vuosissa.

Kuva 27 esittää rakenneyksityiskohdan W1.1 kestojen määrityksiä eri analyysimenetelmillä. Kuvassa vasemman pystyakselin mukaiset tulokset ovat sinisellä ja oikean pystyakselin tulokset oransseilla palkeilla. Tulosten eroavaisuus on suuri. Tulosta saattaa selittää alimallin B liika yksinkertaistaminen verrattuna globaaliin malliin, etenkin kuormituksen osalta. Toisaalta voi olla, että etenkin HS-menetelmällä tehdyn kestoikälaskelmat ovat saattaneet olla särön kehittymisen kannalta hyvin konservatiivisia. Painofunktion osalta IIW-suosituksessa mainitaan painofunktion käytön voi antaa epätäydellisiä tuloksia (Hobbacher 2016, s. 32). Kuitenkin voidaan todeta, että IIW-suosituksessa kuvatun painofunktio-metodin käyttö antoi saman suuntaisia tuloksia, kuin mitä Franc2D -ohjelmalla saadut tulokset olivat ja Franc2D-ohjelmalla saatu jännitysintensiiteettikertoimen kehittyminen oli hyvä verrattaessa muihin tutkimuksiin, joissa painofunktiota oli käytetty (Ahola et al. 2021 ja Pöllänen 2019). Tässä työssä tultiin tulokseen, ettei IIW-suosituksen mukaista painofunktion numeerista integrointia (Hobbacher 2016, s. 32) lähdetty suorittamaan. Painofunktion-menetelmällä lasketun jännitysintensiiteettikertoimen huono sovittautuminen suhteessa Franc2D-ohjelmalla laskettuun arvoon, saattoi johtua särönmuoto-oletuksista. Franc2D-ohjelmalla säröä tutkittuun kaksikulotteisella mallilla, mutta Painofunktiolla laskettaessa käytettiin  $a:c$  suhdetta, jolle annettiin arvoksi 0,2. Muitakin suhdelukuja kokeiltiin (0,2...1,0), mutta tutkimuksessa todettiin, että suhteella 0,2 arvot vastasivat parhaiten Franc2D-ohjelman arvoja.

Tutkimuskohteena oli Artic X54-tyypin raitiovaunun A-korimoduulin korirakenteen yksityiskohtaa W1.1. Tutkimustulokset antavat vahvan vihjeen sen puolesta, ettei kyseinen rakenne ole kovin kriittinen väsymislajuuden suhteen. STT:n suunnittelussa päästiin myös tulokseen, että rakenneyksityiskohdan W1.1 väsymiskestoikä (kestoikä 253 vuotta) ylitti selkeästi Artic XL54 vaunulle suunnitellun käyttöiän (40 vuotta). Rakenteessa olevan hyvin pienen alkusärön ydintymiseen kuuluu käytännössä ääretön aika, verrattuna vaunun suunniteltuun käyttöikänsä. Lisäksi Franc2D-ohjelmalla selvisi, että särön täyty kasvaa verrattain pitkäksi ennen kuin teräkselle tyypillistä jännitysintensiteetin kynnsarvo ylittyi. Näin syvän tai pitkän alkusärön syntymiselle voisi olla mahdollisuus vain siinä tapauksessa, että rakenteeseen kohdistuisi kova iskumainen kuorma kylmissä olosuhteissa. Tällöinkin vasta noin kaksi millimetriä syvä särö alkaisi kasvaa normaalissa vaunun käytössä. Jos jostain syystä rakenteessa joko olisi alun pitäen tai siihen syntyisi hyvin nopeasti yli kaksi millimetriä pitkä särö, tämän työn tulosten perusteella kriittiseksi kasvaneella säröllä menisi vähintään 14 vuotta (Franc2D-ohjelman tulokset), ennen kuin lopullinen murtuma tapahtuu. Toisaalta todettakoon, että iskumaisten kuormitusten mahdollisuutta ja kylmien olosuhteiden vaikutusta ei tutkittu tässä työssä.

Seuraavassa luvussa vedetään yhteen ja pohditaan tutkimustuloksia. Lisäksi hahmotellaan mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Tämän työn tuloksia verrattaessa STT:n kestoikälaskelmiin, voidaan todeta, ettei tutkimustulosten pohjalta tarvitse tehdä muutoksia Artic X54-tyypin raitiovaunusarjan huolto- ja kunnossapito-ohjelmaan.

## 6 Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet

Tämän tutkimus pyrki vastaamaan kysymykseen, onko särön kasvulle edellytykset. Tutkimustuloksia verrattiin STT:n tekemiin lujuuslaskelmiin ja kokeen C27 tuloksiin. Tämän tutkimuksen ja STT:n kestoikälaskemien tulokset erosivat toisistaan, mutta niin että murtumismekaniikan tulokset antoivat rakennevirian syntymiselle huomattavasti pidemmän kestoajan. Tuloksien eroa todennäköisesti selittää eri lähestymistavat kestoajan määrittämiseen. HS-menetelmässä lovivaikutus (särö) otettiin huomioon vastekäyrässä FAT-kertoimella. Toisaalta erot voivat johtua siitä, että särön kasvua tarkasteltiin ekvivalentilla jännitysvaihtelualueella, joka oli vakioamplitudista. Todellisuudessa rakenteeseen kohdistuva kuormitus on vaihtuvaluamplitudista, koska kaikki pienet syklit eivät ole tehollisia pienillä syklimäärillä (Ahola et al. 2021).

Tutkimuksessa käytettiin painofunktion IIW-suosituksen mukaista integraalifunktiota. Painofunktion jännitysintensiteettikertoimen vaihtelualueen arvot osoittivat, että tässä tapauksessa kaksiulotteisen tarkastelun (Franc2D) ja kolmiulotteisen tarkastelun (painofunktio) eivät vastanneet toisiaan kovin hyvin. Syitä voi olla rakenneyksityiskohdasta W1.1 tehtyjen alimallien geometria. jatkotutkimuksissa on suunniteltava tarkemmin eri analyysimenetelmien rajoitteet sekä kolmiulotteisen tarkastelun huomioon ottava alimalli.

Tutkimuksen tavoitteen kannalta olennaista kuitenkin, että painofunktiolla lasketut kestoikä-laskelmat antoivat saman suuntaisia tuloksia Franc2D-ohjelmalla laskettujen kestoikätulosten kanssa. Rakenneyksityiskohdalle W1.1 murtumismekaniikan avulla tehdyt väsymiskes-tävyystarkastelut kuitenkin antoivat huomattavasti pidemmät väsymiskestoajat, kuin HS-menetelmä, mikä viittaa edellisessä kappaleessa mainittuun puutteelliseen alimalliin.

Jatkotutkimuksessa alimallin avulla tehtävä särönkasvun tarkastelu olisi keskeistä toteuttaa kolmiulotteisena. Kolmiulotteisella mallilla pystyttäisiin mallintamaan kolmiulotteinen särö, jolloin mm. särörintaman alimpia ja ylimpiä jännitysintensiteettiaroja voitaisiin tutkia.

Lisäksi tässä tutkimuksessa huomiotta jäi Artic X54-tyyppin raitiovaunujen operoinnin aikaisen ympäristön lämpötilojen sekä kolaritilanteiden vaikutusta erikseen ja yhtäaikaaisesti särön kasvun kehittyminen, joten jatkotutkimuksen kannalta tässä olisi mielenkiintoinen asetelma. Hyvänä jatkotutkimuksen kysymyksenä olisi 1.403-teräslaadun korroosiokestävyysominaisuuksien huomioiminen särön kasvun laskennassa. Vastaavien suurlujuusterästen korroosiokestävyuden vaikutusta särönkasvuun on tutkittu mielenkiintoisin tuloksin (Ahola et al. 2021, s. 4-7), joka antaa viitteitä edellä mainittujen tutkimuskysymysten ulottamista myös Artic X54-tyyppin raitiovaunujen korirakenteisiin.

Tutkimuksessa pystyttiin soveltamaan kaksiulotteista särönmallinnusta todelliseen rakentamiseen, johon vaikuttavat kuormitukset olivat tiedossa. Näin ollen tutkimuksen tulokset antoivat HKL:lle uutta tietoa hankkimasta kalustosarjasta. Tässä työssä päästiin tavoitteeseen, jossa aikaisemmin tehtyjen laskemien tuloksia verrattiin eri menetelmällä tehtyihin laskelmiin, samasta aihepiiristä. Tästä syystä mielenkiintoisia jatkotutkimuksen aiheena on säröntarkastelun kehittäminen kolmiulotteisen tarkastelun suuntaan. Jolloin mahdollisesti saadaan tarkempaa tietoa, jota on mahdollista verrata vaunuista saatavaan tietoon.

## Lähteet

Ahola A., Kauppila J. & Björk T. 2021. Fatigue Strength Assessment of Welded Joint in the Marine Environment – A case Study of Non-Load-Carrying Fillet-Welded Join. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, 7 s.

Autio M. 2017. MLRV03 korin lujuuslaskentaspesifikaatio. Skoda-Transtech Oy, 28 s.

Autio M. 2018. Calculation report: Car body, module A. Skoda-Transtech Oy, 298 s.

Autio M. 2019. Strain Gages in Car Bodies for Stress Measurements during driving. Oulu: Skoda-Transtech Oy, s. 3.

Caprinteri A. 2021. Fracture and Complexity. Solid Mechanics and Its Applications. University of Waterloo, 949 s.

Cui W., Huang X., Wang F. 2014. Description of Fatigue Loading. In: Towards a Unified Fatigue Life Prediction Method for Marine Structures. Advanced Topics in Science and Technology in China. Springer, Berlin, Heidelberg, s.186

Fett T. 2008 Stress Intensity Factors T-Stresses Wight Functions. University of Karlsruhe, s. 195-204

Hakala H. 2012. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 87 s.

Hobbacher A. 2016. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW-document IIW-2259-15 ex XII-2460-13/XV. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, 143 s.

Ikonen K. 1980. J-integraali murtumismekaniikassa. Julkaisussa: Rakenteiden mekaniikka Vol. 12, No. 4, s. 21-36. [verkkodokumentti]. Rakenteiden Mekaniikan Seura ry. Julkaistu: 18.10.2016. [Viitattu: 20.11.2021]. Saatavissa: [http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1980/nro4/RakMek\\_13\\_4\\_1980\\_3.pdf](http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1980/nro4/RakMek_13_4_1980_3.pdf)

Karhunen J., Lassila V., Pyy S., Ranta A., Räsänen S., Saikkonen M & Suosara E. 2004. Lujusoppi. Helsinki: Otatieto Oy, s. 336.

Kärnä T. 1977. Murtumismekaniikasta. Julkaisussa: Rakenteiden mekaniikka Vol. 10 No 4 s. 43-55. [verkkodokumentti]. Rakenteiden Mekaniikan Seura ry. Julkaistu: 15.11.2016. Saatavissa: [http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1977/nro4/RakMek\\_10\\_4\\_1977\\_3.pdf](http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1977/nro4/RakMek_10_4_1977_3.pdf)

Lepola P. & Ylikangas R. 2019. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy, s. 363

Pennala E. 1972. Murtumismekaniikasta. Julkaisussa: Rakenteiden mekaniikka Vol. 5 No 3 s.307-324. [verkkodokumentti]. Rakenteiden Mekaniikan Seura ry. Julkaistu: 11.12.2019. [viitattu: 2.12.2021]. Saatavissa: [http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1972/nro3/RakMek\\_5\\_3\\_1972\\_11.pdf](http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/1972/nro3/RakMek_5_3_1972_11.pdf)

Pöllänen I. 2019. Väitöskirja. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, 117 s.

SFS-EN 12663-1 +A1. 2014. Railway Applications: Structural requirements of railway vehicle bodies. Part 1: Locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons). Yleinen Teollisuusliitto Helsinki: suomen Standardoimisliitto SFS. 41 s.

VTT. 2021. MLRV03 raitiovaunun tyypikoemittaukset: Ajonaikaiset jännitykset. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, s. 44.

Wawrzynek P and Ingrate A. 1991. Franc2D User's Guide. Cornell Fracture Group. Saatavissa: <https://cfg.cornell.edu/software/>

Zehnder A. 2012. Fracture Mechanics. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 62. Springer. 223 s.

Liite 1: Rakenneyksityiskohdan W1.1 väsymiskestävyysslaskelmat (Franc2d ja painofunktiomenetelmä 1)

Rakenneyksityiskohdan W1.1 kestoikälaskelma

Operointitiedot			
Käyttövuodet	40	vuosi	
pvä/v	365		
tunnit/pvä	20	t	
kuormanvaihdot	34		
sallittu $\Delta\sigma$	47	Mpa	

Kestoikä			
Hitsin kestoikä	Franck2D	Painofunktio 1	Yksikkö
$a_i = 0,05$ mm	4,032E+09	5,419E+09	Kuormitusyksiä
$a_f = 3,2$ mm			
N/vuotta	16245	21833	Vuotta

Franc2D

Painofunktio

Vakiokertoimet C ja m

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Särön kasvun vakiot

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Crack sizes:

$$a_i := 0.05 \text{ mm (initial)}$$

$$a_f := 3.2 \text{ mm (final)}$$

Särön koko:

$$a_i := 0.05 \text{ mm (alkusärö)}$$

$$a_f := 3.2 \text{ mm (loppusärön koko)}$$

Paris'n laki :

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K(a))^m} da = 4.032 \times 10^9$$

Paris'n lain mukainen kaava:

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K_2(a))^m} da = 5.419 \times 10^9$$

Kestoikä			
Hitsin kestoikä	Franck2D	Painofunktio 1	Yksikkö
a_i = 0,05 mm	4,028E+09	5,357E+09	Kuormitusyksiä
a_f = 2,03 mm			
N/vuotta	16229	21583	Vuotta

Franck2D

Painofunktio menetelmä

Crack sizes:

$$a_i := 0.05 \text{ mm (initial)}$$

$$a_f := 2.03 \text{ mm (final)}$$

Paris'n laki :

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K(a))^m} da = 4.028 \times 10^9$$

Särön kasvun vakiot

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Särön koko:

$$a_i := 0.05 \text{ mm (alkusärö)}$$

$$a_f := 2.03 \text{ mm (loppusärön koko)}$$

Paris'n lain mukainen kaava:

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K_a(a))^m} da = 5.357 \times 10^9$$

	Kestoikä		
Hitsin kestoikä	Franck2D	Painofunktio 1	Yksikkö
a_i = 2,03 mm	3,497E+06	6,241E+07	Kuormitusyksiä
a_f = 3,2 mm			
N/vuotta	14	251	Vuotta

Franc2D

Painofunktio menetelmä

Crack sizes:

$$a_i := 2.03 \text{ mm (initial)}$$

$$a_f := 3.2 \text{ mm (final)}$$

Paris'n laki :

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K(a))^m} da = 3.497 \times 10^6$$

Särön kasvun vakiot

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Särön koko:

$$a_i := 2.03 \text{ mm (alkusärö)}$$

$$a_f := 3.2 \text{ mm (loppusärön koko)}$$

Paris'n lain mukainen kaava:

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K_2(a))^m} da = 6.24 \times 10^7$$

Liite 2: Rakenneyksityiskohdan W1.1 väsymiskestävyyslaskelma painofunktio-menetelmän arvoilla

Rakenneyksityiskohdan W1.1 kestoikälaskema. Painofunktio 1

data := READPRN("jannitys jakauma2.txt")

a := 0.00, 0.10 .. 4 mm (säron inkrementti)

t := 4 mm (kapllaeen paksuus)

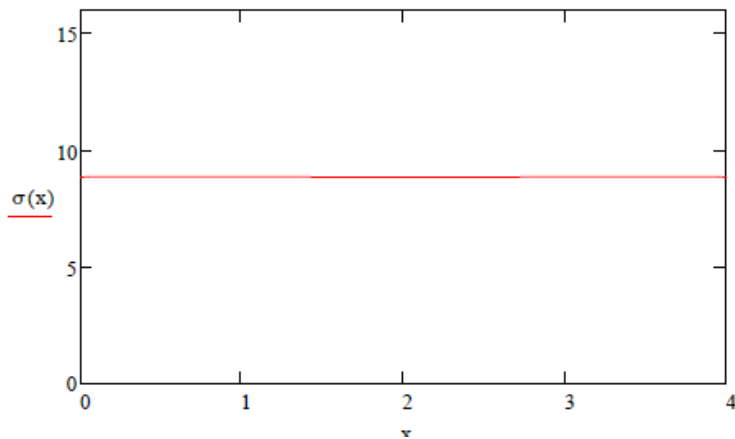
$$\sigma_{\text{data}} := \text{data}^{(1)} =$$

	0
0	8.856
1	8.859
2	8.86
3	8.862
4	8.863
5	8.865
6	8.865
7	8.866
8	8.868
9	8.868
10	8.869
11	8.87
12	8.87
13	8.87
14	8.869
15	...

$$x_{\text{data}} := \text{data}^{(0)} =$$

	0
0	0.041
1	0.082
2	0.123
3	0.164
4	0.205
5	0.246
6	0.287
7	0.327
8	0.368
9	0.409
10	0.45
11	0.491
12	0.532
13	0.573
14	0.614
15	...

x := 0, 0.05 .. 4      $\sigma(x) := \text{linterp}(x_{\text{data}}, \sigma_{\text{data}}, x)$



Painofunkio 3D-kappaleelle, IIW-suosituksen mukaan:

$$A0 := 0.456128 - 0.114206 \cdot (0.2) - 0.046523 \cdot (0.2)^2 = 0.431$$

$$A1 := 3.022 - 10.8679 \cdot (0.2) + 14.94 \cdot (0.2)^2 - 6.8537 \cdot (0.2)^3 = 1.391$$

$$A2 := -2.28655 + 7.88771 \cdot (0.2) - 11.0675 \cdot (0.2)^2 + 5.16354 \cdot (0.2)^3 = -1.11$$

$$B0 := 1.1019 - 0.019863 \cdot (0.2) - 0.043588 \cdot (0.2)^2 = 1.096$$

$$B1 := 4.32489 - 14.9372 \cdot (0.2) + 19.4389 \cdot (0.2)^2 - 8.52318 \cdot (0.2)^3 = 2.047$$

$$B2 := -3.03329 + 9.96083 \cdot (0.2) - 12.582 \cdot (0.2)^2 + 5.3462 \cdot (0.2)^3 = -1.502$$

$$Q := 1 + 1.464 \cdot (0.2)^{1.65} = 1.103$$

$$Y0(a) := B0 + B1 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + B2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4$$

$$Y1(a) := A0 + A1 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + A2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4$$

$$M1a(a) := 3.1415 \cdot \frac{(4 \cdot Y0(a) - 6 \cdot Y1(a))}{\sqrt{2 \cdot Q}} - \frac{24}{5}$$

$$M2a := 3$$

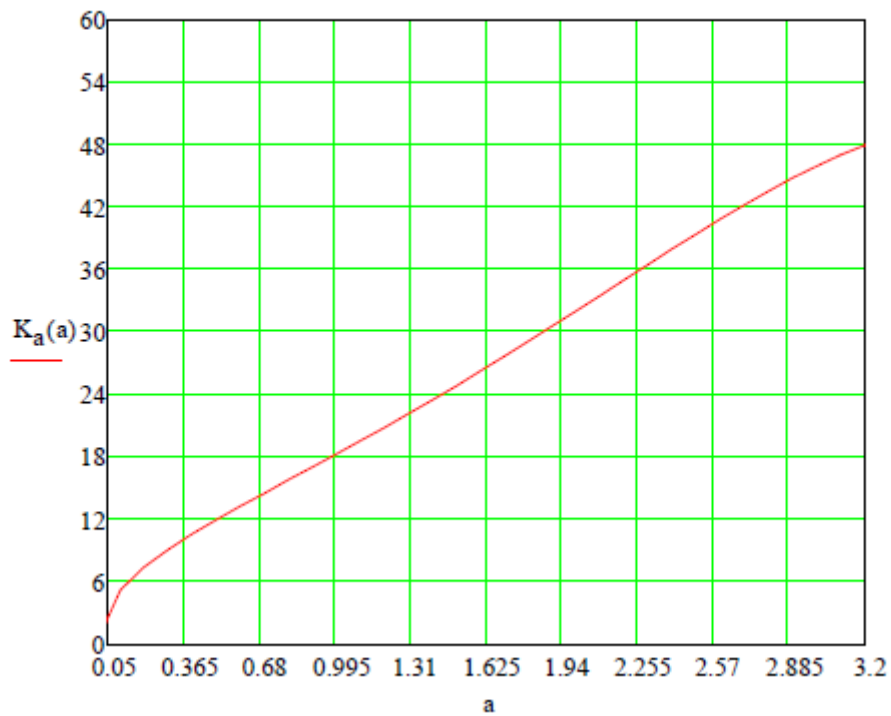
$$M3a(a) := 2 \cdot \left( \frac{3.1415 \cdot Y0(a)}{\sqrt{2 \cdot Q}} - M1a(a) - 4 \right)$$

$$M_a(x, a) := \left[ \frac{2}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (a - x)}} \right] \cdot \left[ 1 + M1a(a) \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{\frac{1}{2}} + M2a \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M3a(a) \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

Painofunktion kaava jännitysintensiiteetikertoimelle (alue)

$$K_a(a) := \int_0^a \sigma(x) \cdot M_a(x, a) dx$$

Jännitysintensiiteetikerroin (alue) painofunktiolla laskettuna:



Särön kasvun vakiot

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Särön koko:

$$a_i := 0.05 \text{ mm (alkusärö)}$$

$$a_f := 3.2 \text{ mm (loppusärön koko)}$$

Paris'n lain mukainen kaava:

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K_a(a))^m} da = 5.419 \times 10^9$$

Särön kasvun vakiot

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Särön koko:

$$a_i := 0.05 \text{ mm (alkusärö)}$$

$$a_f := 2.03 \text{ mm (loppusärön koko)}$$

Paris'n lain mukainen kaava:

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K_a(a))^m} da = 5.357 \times 10^9$$

Särön kasvun vakiot

$$C := 3.00 \cdot 10^{-13} \quad m := 3$$

Särön koko:

$$a_i := 2.03 \text{ mm (alkusärö)}$$

$$a_f := 3.2 \text{ mm (loppusärön koko)}$$

Paris'n lain mukainen kaava:

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (K_a(a))^m} da = 6.24 \times 10^7$$