

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

LASERHITSATUN NURKKALIITOKSEN VÄSYMISKESTÄVYYDEN
MÄÄRITTÄMINEN SÄRÖNKASVUMALLILLA

DETERMINING THE FATIGUE RESISTANCE OF A LASER WELDED JOINT BY
CRACK GROWTH MODELING

Lappeenrannassa 05.02.2017

Henry Ojala

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaaja: DI Heli Mettänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Henry Ojala

Laserhitsatun nurkkaliitoksen väsymiskestävyyden määrittäminen särönkasvumallilla

Kandidaatintyö

2017

34 sivua, 14 kuvaa, 7 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaaja: DI Heli Mettänen

Hakusanat: murtumismekaniikka, kestoikä, FAT, Franc2D, laserhitsaus, nurkkaliitos, jännitysintensiiteetti

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli saada luotettavia tuloksia laserhitsatun nurkkaliitoksen väsymiskestävyydestä. Nurkkaliitosta tarkasteltiin särönkasvumalleilla ja väsytysoikeilla. Työn aihe saatiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriolta ja tuloksista on tarkoitus muodostaa myöhemmin suunnittelukäyrästä.

Liitoksesta mallinnettiin yhdeksän erilaista mahdollista geometriavariaatiota, sekä yhdestä laboratoriokeokappaleesta mallinnettiin yksi puolisyymetrinen malli. Muuttujina malleissa olivat taivutussäde ja hitsin syvyys. Jokaista geometriaa tarkasteltiin veto- ja taivutuskuormituksella ja niiden yhdistelmällä. Saaduista tuloksista pystyttiin vertailemaan kunkin geometriamuutoksen ja kuormitustavan vaikutukset rakenteen kestoikään.

Tuloksista havaittiin, että puhdas vetokuormitus oli kriittisin kuormitustapa. Geometrian muutoksista rakenteen kestoikä kasvoi, kun taivutusastetta pienennettiin ja hitsin syvyyttä kasvatettiin. Tulokset perustuvat Franc2D –särönmallinnusohjelmalla tehtyihin analyyseihin ja särönkasvumallinnuksella saatuihin jännitysintensiiteetikertoimien tuloksiin. Paris'n lakia käyttämällä laskettiin saaduilla jännitysintensiiteetikertoimilla MathCad-ohjelman avulla rakenteen kestoikä ja FAT-luokat.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Henry Ojala

Determining the fatigue resistance of a laser welded corner joint by crack growth modeling

Bachelor's thesis

2017

34 pages, 12 figures, 7 tables and 5 appendixes

Examiner: Professor Timo Björk
Supervisor: Younger researcher Heli Mettänen

Keywords: fracture mechanics, fatigue life, FAT, Franc2D, laser welding, corner joint, stress intensity factor

The goal of this bachelor's thesis was to obtain reliable results regarding the fatigue resistance of the laser-welded corner joint. The corner joint examined by modeling of crack growth. The subject of the work obtained from the steel structures laboratory and design curves will be published later on the basis of the result obtained in this thesis.

9 different geometry variations were modeled on the joint. The variables included the bending radius and the depth of the weld. Each geometry was loaded with five different tension and bending load combinations. From these results, we could compare the effects of each geometry change and load method on the durability of the structure.

The results showed that tensile loading was the most critical load condition. With changes in geometry, the lifetime of the structure increased as the bending radius reduced, and the depth of the weld was increased.

The results based on Franc2D FE-analyzes. From the analyzes, the results of stress intensity factors were obtained by modeling the crack growth. Fatigue strengths were calculated using Paris' law in MathCad program.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tausta ja tavoitteet.....	8
1.2	Työn suoritus ja rajaukset.....	8
2	MURTUMISMEKANIikka	9
2.1	Kuormitustavat ja jännitysintensiiteettikerroin.....	10
2.2	Kestoiän laskenta	10
3	TUTKIMUSMENETELMÄT	13
3.1	Reunaehdot	14
3.2	Paikallisgeometriat ja kuormitustapaukset	15
3.3	Elementtiverkotus	16
3.4	Laboratoriokoe.....	18
3.5	Särönkasvumallinnus laboratoriokappaleelle	19
3.6	Särönkasvumallinnus	22
4	TULOKSET	25
4.1	Kestoiät ja FAT -luokat	25
4.2	Puolisymmetrinen kappale.....	29
5	TULOSTEN TARKASTELU	30
5.1	Kuormitustyyppien vaikutus.....	30
5.2	Geometriamuutosten vaikutus	30
5.3	Puolisymmetrisen kappaleen tulosten tarkastelu	31
6	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET	34
	LIITTEET	

Liite I: Geometriavariaatiot

Liite II: Mallinnettujen liitosten yksityiskohtainen laskentakaava kestoi'ille ja FAT-luokille

Liite III: Mallinnettujen liitosten taulukoidut kestoiät

Liite IV: Mallinnettujen liitosten taulukoidut FAT-luokat

Liite V: Puolisymmetrisen mallin yksityiskohtainen laskentakaava kestoi'ille ja FAT-luokille

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

a_0	Alkusärökoko [mm]
a	Särökoko [mm]
C	Materiaalivakio [-]
E	Kimmokerroin [GPa]
ΔF	Sylinterivoiman vaihtelu [kN]
K	Jännitysintensiiteettikerroin [$\text{MPa(m)}^{0.5}$]
K_C	Kriittinen jännitysintensiiteettikerroin [$\text{MPa(m)}^{0.5}$]
K_{th}	Jännitysintensiiteettikertoimen kynnysarvo [$\text{MPa(m)}^{0.5}$]
K_i	Avautumismoodin jännitysintensiiteettikerroin [$\text{MPa(m)}^{0.5}$]
L	Kappaleen pituus [mm]
m	S-N-käyrän kulmakerroin [-]
N	Kestoikä, kuormittavien syklien lukumäärä [-]
N_f	Vaurioon johtaneiden kuormituskertojen lukumäärä [-]
n	da/dN – käyrän kulmakerroin
R	Nurkan pyöristyssäde [mm]
S	Nimellinen jännitys [MPa]
s	Hitsin syvyys [mm]
t	Materiaalin paksuus [mm]
ν	Poissonin kuromavakio [-]
x	Materiaalin syvyys [mm]
$\Delta\sigma$	Jännitysvaihtelu [MPa]
DOB	Degree of bending (taivutuksen osuus kuormituksesta)
FAT	Fatigue class (väsymiskestävyysluokka)
FE	Finite element (äärellinen elementti)
SIF	Stress Intensity Factor (jännitysintensiiteettikerroin)

1 JOHDANTO

Hitsatuissa liitoksissa väsyminen on ilmiö, jossa vaihteleva jännitys saa aikaan särön kasvun. Särönkasvuilmiöt alkavat usein pienistä alkusäröistä, jotka yleensä syntyvät valmistusvaiheessa tapahtuvista virheistä. Käytönaikaiset särönkasvuilmiöt rajoittavat rakenteen elinikää, aiheuttaen rakenteen murtumisen tai rakenteen muuttumisen käyttökelvottomaksi. (Niemi & Kemppe 1993, s. 229–230)

Tässä kandidaatintyössä on tutkittu laserhitsatun nurkkaliitoksen väsymiskestävyyttä mallintamalla väsymissäron kasvua. Liitoksen väsymistä on tutkittu selvittämällä, kuinka taivutussäde ja hitsautumissyvyys vaikuttavat liitoksen kestävyteen. Tapauksia on tutkittu viidellä erilaisella veto- ja taivutusasteisella kuormituksella (DOB). Lisäksi kuudelle kappaleelle on tehty laboratoriossa väsytysoke eri suuruksilla kuormituksilla. Yhdestä laboratoriokappaleesta on mallinnettu puolisyymetrinen malli, jolle on tehty särönkasvumallinnus. Kuvassa 1 on esitetty tutkittavan hitsausliitoksen periaatekuva, johon on merkitty tarkemmin tarkasteltavat laserhitsatut nurkkaliitokset.



Kuva 1. Hitsausliitoksen periaatekuva

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Työ on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriolle. Työn tavoitteena oli analysoida liitoksen ja rakenteen väsymiskestävyyttä. Työssä on vertailtu myös laskennallisesti saatuja tuloksia väsytykokeissa saatuihin tuloksiin. Saaduista tuloksista tullaan tekemään XXFAT –ohjelmaan suunnittelukäyrästä, jolla voidaan analysoida vastaavanlaisia liitoksia helposti ja nopeasti.

1.2 Työn suoritus ja rajaukset

Työ on suoritettu laskennallisena selvityksenä. Työssä on tutkittu rakennetta yksinkertaistetulla mallilla, josta on mallinnettu yhdeksän erilaista geometriavariaatiota. Lisäksi yhdestä laboriokappaleesta on mallinnettu puolisyymmetrinen malli. Kaikille tapauksille tehdään FE-analyysi (Finite element), jonka jälkeen malleille on suoritettu särönkasvumallinnus. Särönkasvua on tutkittu juuren- sekä reunaviivan puolelta riippuen kuormituksen taivutusasteesta. Tehdyistä analyyseistä on selvitetty särökokojen jännitysintensiiteettikertoimet eli SIF-arvot, joilla on laskettu liitoksen kestoikä, sekä FAT-luokka. Työssä on myös vertailtu laskennallisesti saatuja tuloksia laboriokokeessa saatuihin tuloksiin.

2 MURTUMISMEKANIikka

Hitsatuille rakenteille väsymistarkasteluita on useita ja ne poikkeavat toisistaan. Yleisemmin käytetyistä vaihtoehdoista tarkin on murtumismekaniikka. Se ottaa huomioon myös olosuhteet särön pohjalla, mitä muut yleisesti käytetyt menetelmät, kuten nimellisen jännityksen menetelmä, rakenteellisen jännityksen menetelmä tai tehollisen lovijännityksen menetelmä eivät huomio. (Niemi & Kemppe 1993, s. 245) Siksi tässä työssä on keskitytty murtumismekaniikkaan.

Murtumismekaniikassa tutkitaan säröjä ja niiden kasvua, jotta rakenteiden murtumista voitaisiin kontrolloida tai kokonaan välttää. Kaikissa käytännön materiaaleissa ja etenkin hitsatuissa rakenteissa voi havaita mikroskooppisen pieniä alkuvikoja, joista saattaa syntyä jännitysvaihteluiden seurauksena säröjä. Syntyneet säröt voivat kasvaessaan aiheuttaa rakenteen murtumisen. (Pennala 2002, s. 365–366)

Murtumismekaniikka jaetaan kahteen osaan – mikrorakennetta tutkivaan ja makroskooppiseen. Mikrorakennetta tutkivassa murtumismekaniikassa tutkitaan kide- ja hilavirheitä. Siinä pyritään selvittämään murtumisen syitä ja siten kehittämään entistä parempia materiaaleja. Makroskooppinen murtumismekaniikka on laskennallinen osaan. Se käsittelee murtumista ilmiönä ja ei puutu aineen sisäisen rakenteen yksityiskohtiin. (Ikonen & Kantola 1986, s. 13–23. Erkki Pennala 2002, s. 365–367.) Tässä työssä on haluttu selvittää rakenteiden kestoikä ja väsymiskestävyyssluokka laskennallisena selvityksenä, minkä takia tässä työssä on keskitytty makroskooppiseen murtumismekaniikkaan.

Makroskooppinen murtumismekaniikka jaetaan vielä kahteen tarkastelutasoon - lineaariseen ja epälineaariseen murtumismekaniikkaan. Näistä lineaarinen pääteoria soveltuu paremmin haurasmurtumille, sillä se ei ota huomioon materiaalin voimakasta plastisoitumista. Sitä voidaan kuitenkin käyttää, jos särön kärjessä ei oleteta olevan merkittävää plastisoitumista. Jos taas särön edessä oleva alue on huomattavasti plastisoitunut, käytetään epälineaarista murtumismekaniikkaa. (Ikonen & Kantola 1986, s. 13–23, Erkki Pennala 2002, s. 365–367). Tässä työssä särön kärjessä ei oletettu tapahtuvan merkittävää plastisoitumista, koska

kuormitustasot ovat alhaiset, joten tässä työssä on käytetty lineaarista murtumismekaniikkaa.

Murtumismekaniikka soveltuu siis hyvin hitsatuille rakenteille, sillä hitsausvirheet ovat yleinen ongelma hitsatuissa rakenteissa. Hitsausvirheet aiheuttavat rakenteisiin alkuvikoja, joista särö lähtee etenemään. Särön kriittisimmät alkukohtat ovat hitsin rajaviiva ja juuri. (Niemi & Kemppi 1993, s. 229–230.)

2.1 Kuormitustavat ja jännitysintensiiteettikerroin

Kun materiaali on lineaarielastinen ja isotrooppinen voidaan murtumismekaniikassa käyttää jännitysintensiiteettikerrointa K (Dowling 2007, s. 324.). Jännitysintensiiteettikerroimen arvo koostuu särön koosta, nimellisjännityksestä ja geometrian yhteisvaikutuksesta. Lineaariselastisessa menetelmässä rakenteen oletetaan murtuvan, kun särön aiheuttama jännitysintensiiteettikerroin saavuttaa materiaalin murtumissitkeyden. Tätä murtositkeyttä kutsutaan kriittiseksi jännitysintensiiteettikerroimeksi K_c . (Dowling 2007, s. 317.)

Kuormitustavat voidaan jakaa kolmeen erilaiseen perusmoodiin: avautumismoodi, liukumoodi ja kiertomoodi. Kuormitustavat kuvaavat säröpintojen liikettä suhteessa toisiinsa. Kuormitustavoista avautumismoodi on kaikista yleisin ja vaarallisin. Liukumis- ja repimismoodit toimivat usein sekundäärisinä tekijöinä särön kasvussa. (Ikonen & Kantola 1986, s. 81–88) Särön tarkastelu tässä työssä on rajoitettu avautumismoodin jännitysintensiiteettikerroimen K_i tarkasteluun.

2.2 Kestoiän laskenta

Hitsin rajapinnassa tai juuressa oletetaan aina olevan pieni särö. Tällöin pystytään määrittämään jännitysintensiiteettikerroin K seuraavasti.

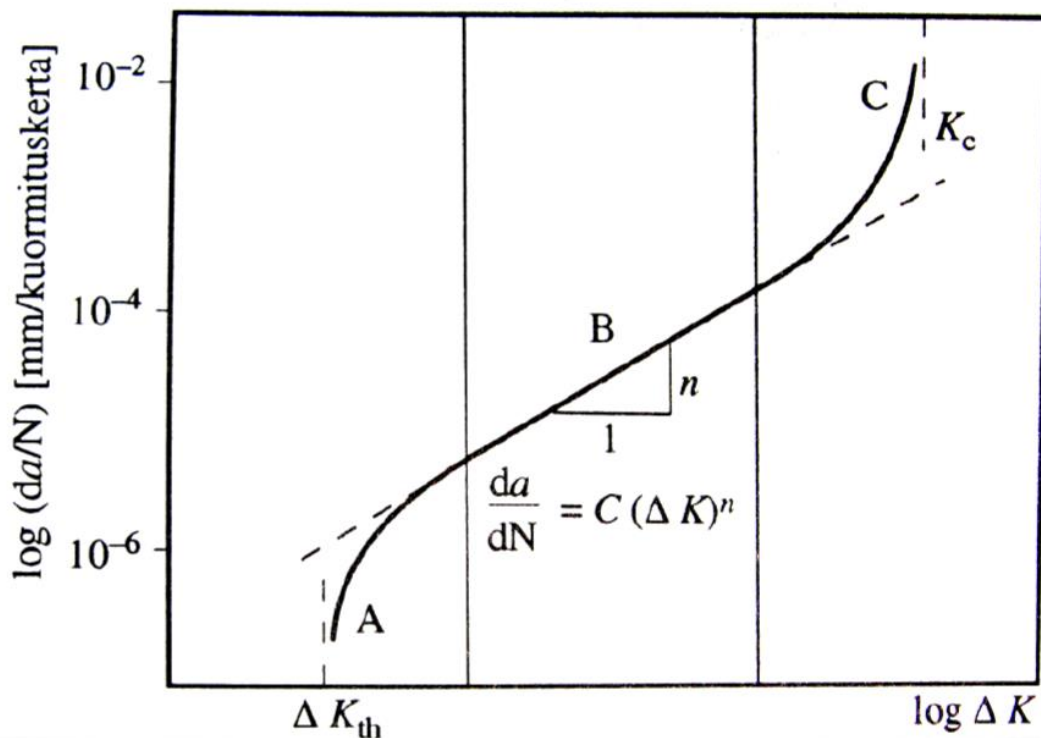
$$K = S\sqrt{\pi a}F \quad (1)$$

Yhtälössä 1 S kuvaa rakenteen nimellisjännitystä ilman säröä, a särön pituutta ja F särön ja kappaleen geometrisia ominaisuuksia. (Dowling 2007, s. 317.)

Jännitysintensiiteettikertoimen avulla voidaan arvioida plastisen alueen kokoa ja kappaleen särönkasvunopeutta. Särönkasvusta voidaan esittää kuvan 2 mukainen särön kasvunopeuskäyrä. Kuva on jaettu kolmeen alueeseen, joista ensimmäisessä eli A-alueessa ei tapahdu merkittävää särönkasvua. Tämän alueen raja-arvona pidetään jännitysintensiiteettikertoimen kynnsarvoa K_{th} . Viimeisessä eli C-alueessa tapahtuu epästabiilia ja nopeaa särönkasvua. Tämän alueen raja-arvo särönkasvulle on kriittinen jännitysintensiiteettikerroin K_c . Keskimmaisessä eli B-alueessa käyrä noudattaa Paris'n yhtälöä.

$$\frac{da}{dN} = C_0(\Delta K)^n. \quad (2)$$

Kaavassa 2 N on kuormituskertojen lukumäärä, ΔK jännitysintensiiteettikertoimen vaihtelu ja C_0 , sekä n ovat materiaalivakioita. (Hobbacher, 2008, s. 92.)



Kuva 2. Särön kasvunopeuskäyrä (Pennala 2002, s. 379.)

Integroimalla Paris'n yhtälö voidaan määrittää kestoikä N seuraavasti.

$$N = \frac{1}{c} \int_{a_0}^a (\Delta K)^{-n} da \quad (3)$$

Kaava 3 ilmoittaa särön kestoiän alkupituudesta a_0 pituuteen a . (Pennala 2002, 378-379).

Väsymislukka on yksittäiselle rakenneyksityiskohdalle annettu numeroarvo, mikä kertoo parhaiten soveltuvan S-N-käyrän väsymisen arviointiin. Väsymislukka kertoo väsymislujuuden kahden miljoonan jännityssyklin kohdalla. (SFS-EN 1993-1-9, 2006, s. 9.) Väsymiskestävyysluokka FAT voidaan laskennallisesti määrittää seuraavasti.

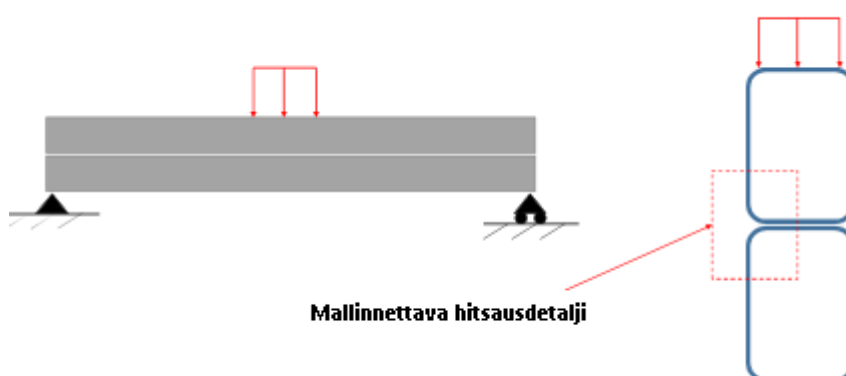
$$FAT = \sqrt[m]{\frac{N_f}{2 \cdot 10^6}} * \Delta\sigma, \quad (4)$$

Kaavassa 4 $\Delta\sigma$ on jännitysvaihtelu, N_f vaurioon johtaneiden kuormitusten lukumäärä, sekä m on S-N-käyrän kulmakerroin.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä luvussa on esitetty käytetyt tutkimusmenetelmät, joiden avulla hitsin kestoikä ja FAT-luokka on selvitetty. Kaikille elementtimalleille on suoritettu analyysit Franc2D-ohjelmalla, joka perustuu lineaariseen murtumismekaniikkaan. Franc2D on kaksiulotteinen elementtimenetelmään perustuva särömallinnusohjelma, jolla voidaan mallintaa särön etenemistä tasotapauksissa ja laskea särön jännitysintensiteettikertoimet. Elementtimallien esikäsittelijänä on käytetty CASCA -ohjelmaa, jolla voidaan tallentaa mallit suoraan Franc2D:n käyttämään inp-muotoon. Kaikille malleille on suoritettu aluksi lineaariselastinen FE-analyysi, joka käyttää Gaussin eliminointiin perustuvaa ratkaisijaa. Tämän jälkeen kappaleeseen on luotu alkusärö ja suoritettu särön kasvun mallinnus. Särön kasvun mallinnuksesta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.4. Tässä työssä materiaalina on käytetty terästä, jonka kimmokerroin on $E=210\text{GPa}$ ja Poissonin kuroumavakio $\nu=0,3$.

Tutkittava rakenne koostuu kahdesta päällekkäin olevasta rakenneputkesta, johon vaikuttaa yläpuolelta tuleva kuormitus. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva tutkittavasta rakenteesta, johon on merkitty myös mallinnettava hitsausdetalji, jota tässä kandidaatintyössä on tutkittu.



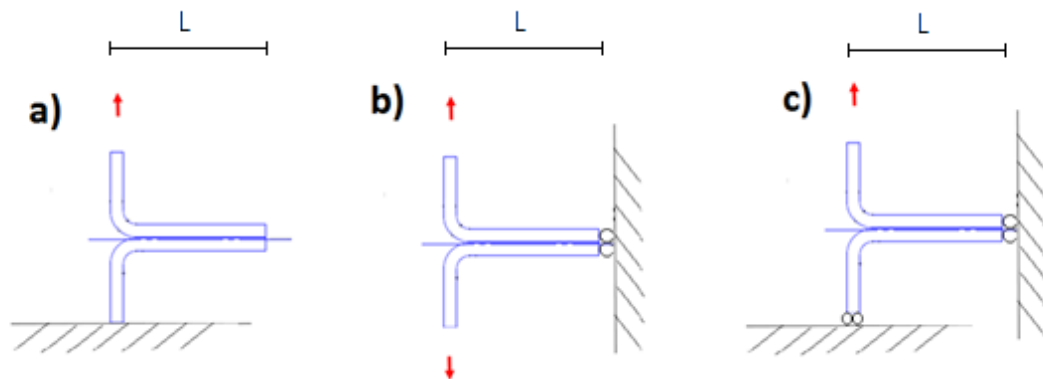
Kuva 3. Periaatekuva koko rakenteesta

Tässä tutkimuksessa hitsausdetaljin väsymiskestävyyttä on tutkittu yhdeksällä erilaisella mallilla, joissa on muutettu hitsaussyvyyttä ja taivutussädettä. Jokaista mallia on kuormitettu viidellä erilaisella kuormituksella. Paikallisgeometrioiden muutoksista ja

kuormitustapauksista on kerrottu kappaleessa 3.2 enemmän. Lisäksi yhdestä laboratorioskappaleesta on mallinnettu puolisyymetrinen kappale, jolle on tehty vastaavat analyysit. Puolisyymentrisestä kappaleesta on kerrottu enemmän kappaleessa 3.4.

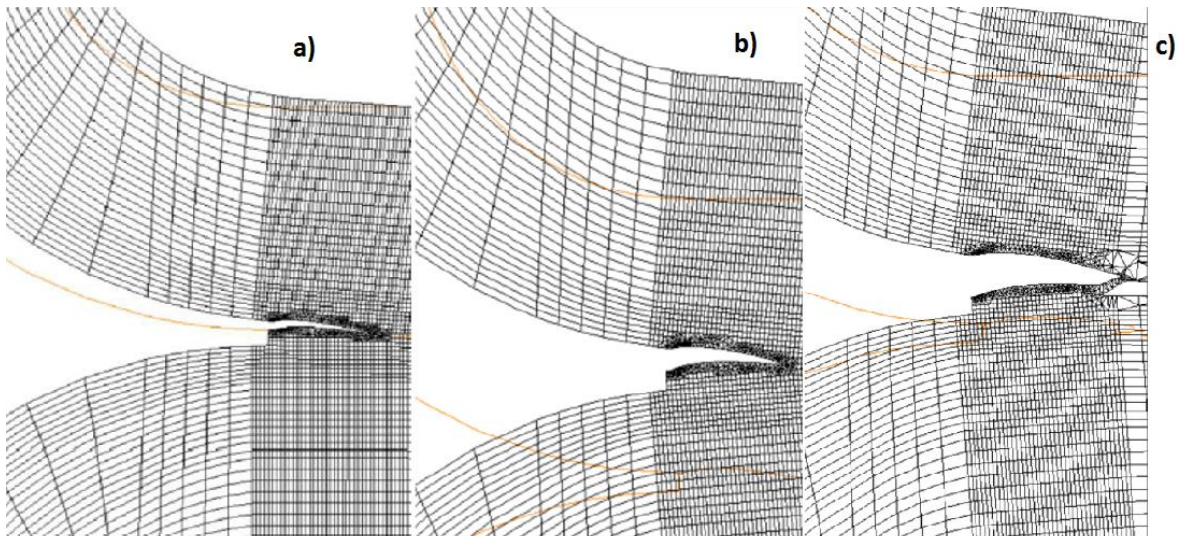
3.1 Reunaehdot

Mallinnettavaa liitosta on tutkittu kolmella erilaisella reunaehdolla, joista jokainen tapaus on toteutettu kolmella eri L pituudella. Eri pituuksia käyttämällä pyrittiin tarkastelemaan pituuden vaikutuksia särössä esiintyviin jännityksiin. Kuvassa 4 on esitetty eri reunaehtovariaatiot.



Kuva 4. Reunaehtovariaatiot

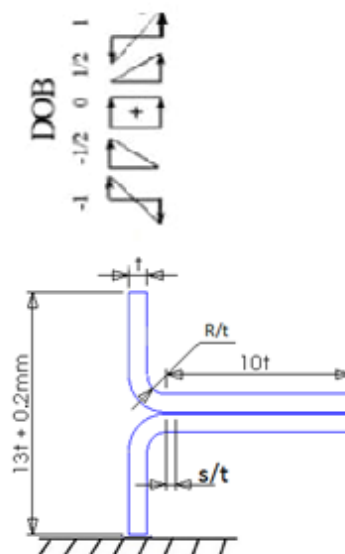
Reunaehtoja on vertailtu, jotta saataisiin yleispätevä malli, jota voitaisiin hyödyntää erikokoisille putkiliitoksille. Näistä reunaehtotapauksista on valittu ensimmäinen eli a-tapaus. Se oli esimerkeistä ainoa tapaus, jossa pituudella L ei ollut vaikutusta särön jännityksiin. Lisäksi se antoi huonoimmat väsymiskestävyydet, jolloin se oli ns. ”worst-case”-tapaus. Kolmannessa eli c-tapauksessa särön kulkureitti kulki juuren hitsin kärjen ohi, jolloin särön eteneminen ei noudata lyhyimmän reitin periaatetta. Särön kulkureitit eri reunaehtovariaatioissa on esitetty kuvassa 5. Kaikissa tapauksissa on käytetty ainevahvuutta pienempää hisaussyvyyttä, jolloin särön kulkureitti on hitsin rajaviivalta hitsin juurelle.



Kuva 5. Särön eteneminen c-tapauksessa

3.2 Paikallisgeometriat ja kuormitustapaukset

Tutkimuksessa käytetyt muuttujat on valittu niin, että ne vastaavat todellisia mahdollisia liitoksia ja niiden variaatiota. Näin pystytään arvioimaan liitoksen väsymiskestävyyttä, sekä saaduista tuloksista voidaan muodostaa työkalukäyrästä. Muuttujat voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan - kuormitustyyppeihin ja paikallisgeometrioihin. Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva mallinnettavasta geometriasta. Kuvaan on myös merkitty eri DOB-kuormitustapaukset, sekä muuttuvat paikallisgeometriat.



Kuva 6. Periaatekuva mallinnettavasta kappaleesta

Kuormituksina on käytetty viittä erilaista kuormitustyyppiä: puhdas vetokuormitus ($DOB = 0$), molemmin päin olevat puhtaat taivutuskuormitukset ($DOB = 1$ ja $DOB = -1$), sekä molemmin päin olevat yhdistetyt veto- ja taivutuskuormitukset, jossa taivutuksen osuus kuormituksesta on puolet ($DOB = 1/2$ ja $DOB = -1/2$). DOB siis kertoo taivutuksen osuuden kuormituksesta. Taivutusasteet on määritelty kaavalla 5

$$DOB = \Delta\sigma_b / (|\Delta\sigma_m| + |\Delta\sigma_b|), \quad (5)$$

jossa $\Delta\sigma_b$ on nimellisen jännityksen vaihteluväli ja $\Delta\sigma_m$ on kalvojännityksen vaihteluväli. Kuormitusten suurimmat vetojännitykset ja pienimmät puristusjännitykset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Jännitysten suuruudet

DOB	-1	- 1/2	0	1/2	1
Pienin (MPa)	10	10	10	0	-10
Suurin (MPa)	-10	0	10	10	10

Paikallisgeometrian muuttujat ovat levyn taivutusaste (R) ja hitsin syvyys (s). Kaikissa malleissa ilmarako on pidetty vakiona 0.2 mm. Kaikki geometriavariaatiot on esitetty liitteessä 1. Kappaleen oletetaan olevan tasovenymätilassa, jolloin venymät on estynyt syvyysuunnassa. Taulukossa 2 esitetään käytetty ainevahvuus, sekä taivutussäteen ja hitsin syvyyden kertoimet suhteessa ainevahvuuteen.

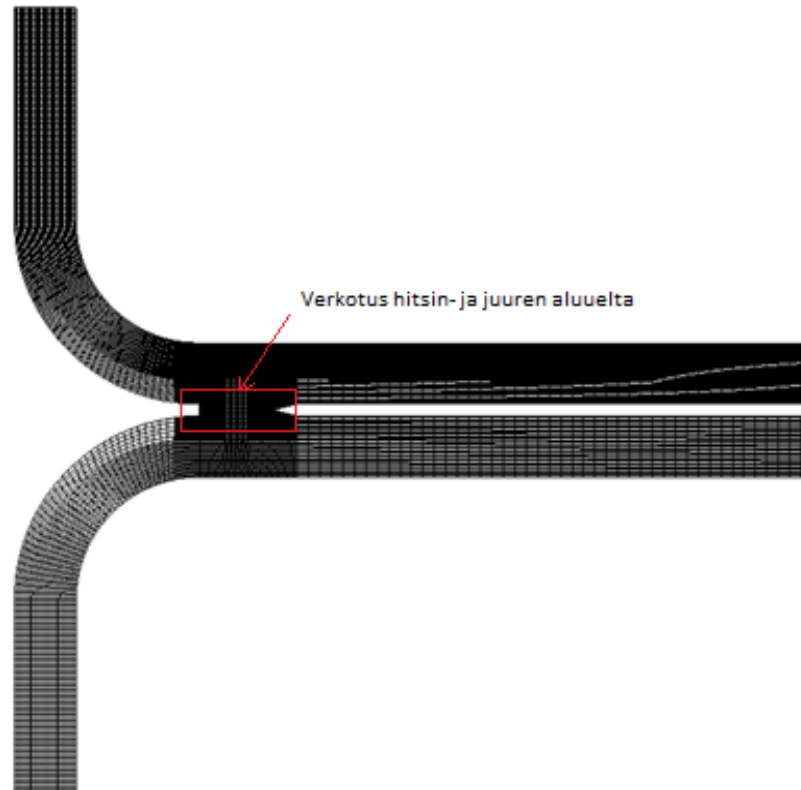
Taulukko 2. Paikallisgeometrioitten arvot

Paikallisgeometriat	Arvot		
t (mm)		1,00	
	Kertoimet		
s/t	0,50	1,20	2,00
R/t	1,00	2,00	4,00

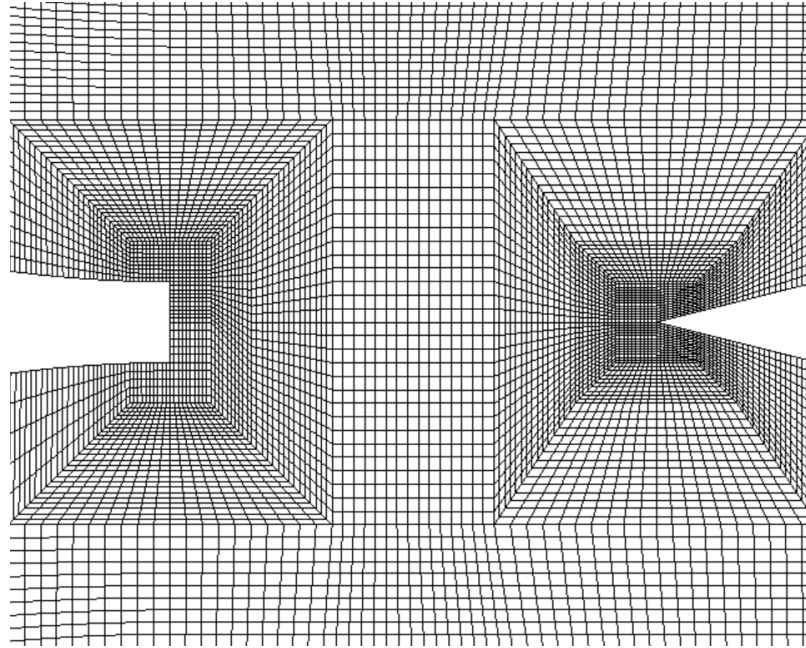
3.3 Elementtiverkotus

Työssä on käytetty kahdeksan solmuista nelisivuista elementtiä. Se on isoparametrinen elementti, mikä on tulosten kannalta osoittautunut tarkimmaksi elementtityypiksi (Ikonen &

Kantola 1986, s.196). Verkotus on pyritty toteuttamaan siten, että verkotus on tiheintä hitsin rajapinnan ja juuren alueella. Verkotus harventuu tasaisesti, kun siirrytään kauemmas kriittisiltä alueilta. Kuvassa 7 on esitetty yhden tutkimuksessa käytetyn mallin verkotus, johon on rajattu punaisella neliöllä kriittisimmän alueen eli hitsin rajapinnan ja juuren alueen verkotus, mikä on esitetty tarkemmin kuvassa 8.



Kuva 7. Elementtiverkotus koko kappaleessa



Kuva 8. Elementtiverkotus hitsin rajaviivan ja hitsin juuren alueelta

3.4 Laboratoriokoe

Kestoikämitoitus on suoritettu myös laboratoriokokeessa. Kuvassa 9 on esitetty yhdestä laboratoriokoe-kappaleesta esimerkkikuva. Kappaleen tarkemmat mitat on esitetty kuvassa 10.



Kuva 9. Esimerkkikuva laboratoriokoe-kappaleesta

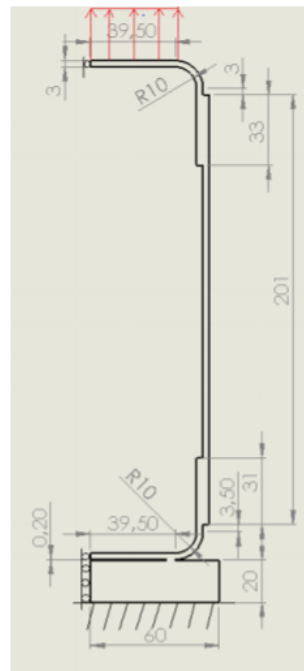
Rakenne asetettiin tiukasti pöytään kiinni ja sitä kuormitettiin sylinterillä vaihtelevilla vetovoimilla kappaleen yläpinnalta. Koe tehtiin kuudelle samanlaiselle kappaleelle käyttäen eri vetovoimia, joista jokaisessa tapauksessa tarkasteltiin kuormituskertojen lukumääriä. Taulukossa 3 on esitetty käytetyt vetovoimat ja saadut kuormituskertojen lukumäärät.

Taulukko 3. Käytetyt sylinterivoimat ja kestoiät

	$\sim\Delta F$ (kN)	N (kpl)
KO_4	10	143232
KO_5	35	1916
KO_6	10	35874
KO_8	12	55250
KO_9	12	38806
KO_12	92	245

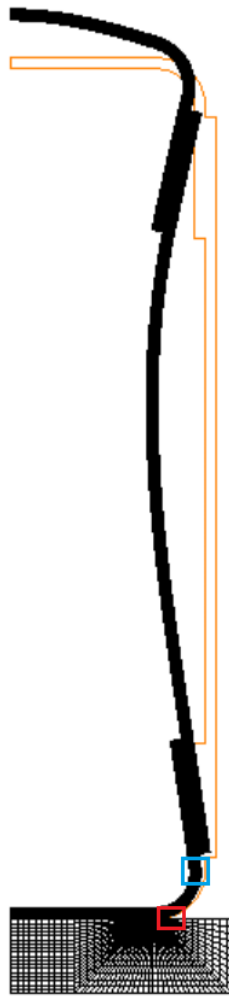
3.5 Särönkasvumallinnus laboratorioskappaleelle

Särönkasvumallinnus on suoritettu laboratorioskokeessa väsytylle KO_4 koekappaleelle, jossa on käytetty 10 kN suuruutta vetovoimaa. Koekappaleesta on mallinnettu puolisyymmetrinen malli, joka on esitetty mittoineen kuvassa 9.

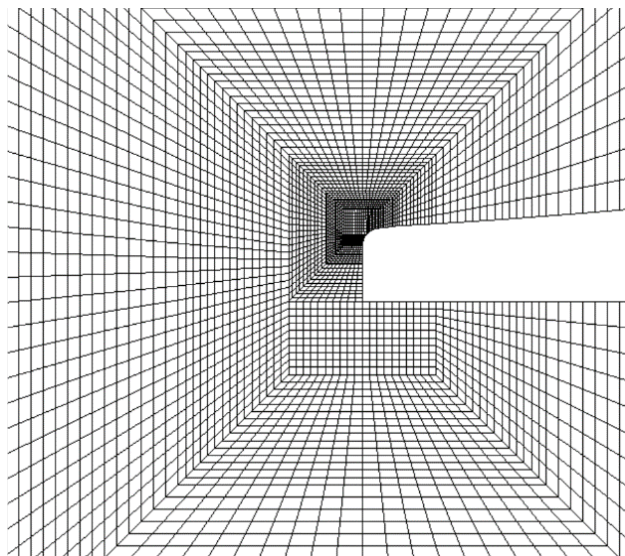


Kuva 10. Puolisymmetrinen malli KO_4 esimerkkitapauksesta

Kuvaan 10 on myös merkitty käytetyt reunaehdot ja kuormitus. Alapinta on kiinnitetty jäykästi ja vasemman sivun x-suuntainen siirtymä on estetty symmetriaehdon takia. Kuvasta nähdään, että koekappale oli ainevahvuudeltaan 3 mm, kun parametrisoiduissa malleissa on käytetty 1 mm ainevahvuutta. Koekappaleissa syvyys oli 100 mm, kun taas tässä mallissa on käytetty 1 mm syvyyttä, koska kyseessä tasovenymätila jolloin syvyydellä ei ole vaikutusta saatuihin tuloksiin, mutta kuormituksen määrittäminen on yksinkertaisempaa. Mallille 10 kN vastaava kuormitus on tällöin 1.2658 MPa. Kuvassa 11 on esitetty kokokappaleen elementtiverkotus ja kuormituksesta johtuva deformaatiomuoto. Kuvaan on merkitty sinisellä neliöllä alue, mistä on määritetty rakenteellinen jännitys. Rakenteellisen jännityksen määrittämisestä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 4.3. Kuvaan on merkitty myös punaisella neliöllä hitsin rajaviivan alue, mikä on esitetty tarkemmin kuvassa 12.



Kuva 11. Puolisymmetrisen mallin elementtiverkotus ja deformaatiomuoto



Kuva 12. Hitsin rajaviivan pyöristys ja elementtiverkotus

Kuvasta 12 nähdään, että hitsin yläpuolisessa rajaviivassa on käytetty 0.1 mm pyöristystä. Särönkasvumallinnus on tehty myös kappaleelle, jossa on käytetty vastaavassa kohdassa terävää kulmaa. Tuloksissa ei esiintynyt kuitenkaan merkittäviä muutoksia kestoiässä.

3.6 Särönkasvumallinnus

Parametrisoidussa yksinkertaistetussa liitoksessa ja laboratoriokokeen puolisyymetrisessä mallissa särönkasvumallinnus on suoritettu Franc2D-ohjelmalla. Kaikissa tapauksissa säröä kasvatettiin automaattisella särönkasvatuksella, jolle valittiin jännitysintensiteettikertoimien ratkaisumenetelmäksi J-integraali ja särön kasvusuunnaksi maksimi kehäjännityskriteeri (Sigma-Theta Maximum). Lisäksi kaikissa tapauksissa on käytetty samaa alkusäröä 0.025 mm ja säröä on kasvatettu taulukon 4 mukaisin särönkasvuaskelin.

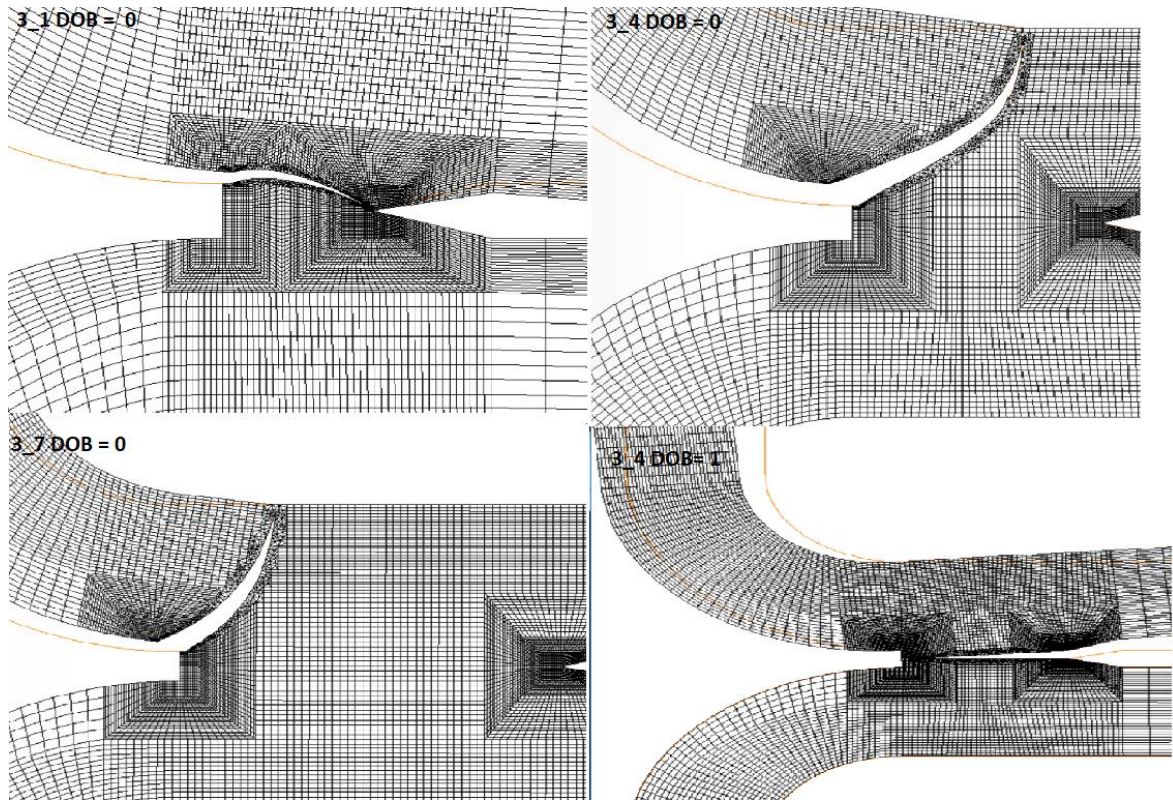
Taulukko 4. Särön kasvun askeleet

a	da	nro
0,025		1
0,0375	0,0125	2
0,05	0,0125	3
0,075	0,025	4
0,1	0,025	5
0,125	0,025	6
0,15	0,025	7
0,175	0,025	8
0,225	0,05	9
0,275	0,05	10
0,325	0,05	11
0,375	0,05	12
0,425	0,05	13
0,525	0,1	14
0,625	0,1	15
0,725	0,1	16
0,825	0,1	17
0,925	0,1	18
1,125	0,2	19
1,325	0,2	20
1,525	0,2	21
1,725	0,2	22
1,925	0,2	23
2,425	0,5	24
2,925	0,5	25

Kaikissa ulokepalkkitapauksissa ei kuitenkaan ollut yhtä monta särönkasvuaskelta, koska askelten määrä riippui ainevahvuudesta, hitsin syvyydestä, sekä särön kulkusuunnasta. Kaikissa tapauksissa särö on kasvatettu viimeiseen mahdolliseen askeleeseen taulukon 4 mukaisesti. Säröä ei kuitenkaan pystynyt kasvattamaan kappaleen lopulliseen murtumiseen asti, sillä Franc2D ei kyennyt suorittamaan analyysyä, kun särö ylitti geometrian. Tällä ei kuitenkaan ole merkittävää merkitystä tulosten kannalta, sillä selvästi suurimmat kuormituskertojen lukumäärät syntyivät särönkasvatuksen alkuvaiheessa.

Jokaiselle tapaukselle alkusärö on asetettu kriittisimpään kohtaan, josta kappale todennäköisesti lähtee murtumaan. Kaikissa kuormitustapauksissa lukuun ottamatta $DOB = 1$ jännityksen kriittisin kohta oli hitsin reunan rajaviiva. $DOB = 1$ kuormitustapauksessa hitsin juuri osoittautui kriittisimmäksi. Kuvassa 13 on vertailtu hitsaussyvyiden vaikutusta

särön etenemiseen $DOB = 0$ kuormitustapauksessa. Vasemmassa yläkulmassa on tapaus 3_1, jossa hitsaussyvyys on pienempi kuin ainevahvuus. Oikealla yläkulmassa on tapaus 3_4 ja vasemmalla alakulmassa 3_7, joissa hitsaussyvyys on suurempi kuin ainevahvuus. Lisäksi oikeassa alakulmassa esitetty särön kulkureitti tapauksessa 3_4, kun kuormitustapaus on $DOB = 1$.



Kuva 13. Särön kulkureitit

4 TULOKSET

Franc2D:lla on saatu simuloinnin tuloksena, jokaista kasvatettua särökokoja vastaavat intensiteettikertoimet. Jännitysintensiteettikertoimilla on laskettu MathCad-ohjelmalla vaurioon johtaneiden kuormituskertojen lukumäärä ja FAT-luokka. MathCad-ohjelmassa käytetyt kaavat parametrisoidun liitoksen laskennassa on esitetty liitteessä II ja puolisyymmetriselle mallille liitteessä V. Kun tiedetään rakenteellinen jännitys liitoksessa, voidaan määrittää liitoksen väsymiskestävyys eli FAT-luokka.

Yleisesti tuloksista voidaan todeta, että ulokepalkkimalleissa puhdas vetokuormitus on kaikista kriittisin kuormitustapa. Levyn taivutusastetta pienentämällä ja hitsin syvyyttä kasvattamalla, saatiin kasvatettua rakenteen kestoikää. Tässä kappaleessa ilmoitetaan saadut kestoiät vain muutamilla särökoilla. Muutamalla särökoolla pystytään hyvin havainnollistamaan geometriamuutosten ja kuormitustyyppien vaikutukset. Kaikki tulokset on kuitenkin esitetty liitteissä III ja IV.

4.1 Kestoiät ja FAT -luokat

Taulukossa 5 on ilmoitettu rakenteen kestoiät neljälle särökoolle kullekin geometrialle ja sen kuormitustyypeille. Vastaavat FAT-luokat on esitetty taulukossa 6. Kukin särökoko ilmoittaa rakenteen kestoiän kyseisellä alkusärökoolla. Kullekin Loput tulokset on esitetty liitteissä III ja IV. Geometriat on nimetty liitteen I mukaisesti. Tulokset on ilmoitettu taulukoissa, koska kuormitustyyppien kestoi'issä ja FAT-luokissa oli erittäin suuria eroja, minkä takia niistä ei pystynyt esittämään havainnollistavia kuvaajia.

Taulukko 5. Geometriavariaatioiden ja kuormitustapauksien kestoajat

Geometria		DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB = 1	DOB = 1/2
	ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
3_1						
	0,025	6.73E+04	4,19E+05	1,01E+08	4,40E+07	7,09E+05
	0,075	3,41E+04	2,12E+05	5,28E+07	2,29E+05	3,57E+05
	0,175	7,83E+03	4,91E+04	1,27E+07	4,72E+04	8,19E+04
	0,275	1,16E+03	7,27E+03	1,94E+06	5,55E+05	1,21E+04
3_2						
	0,025	1,91E+04	1,29E+05	1,01E+08	4,40E+07	1,82E+05
	0,075	9,78E+03	6,62E+04	5,31E+07	2,29E+07	9,33E+04
	0,175	2,29E+03	1,55E+04	1,28E+07	4,72E+06	2,18E+04
	0,275	342,285	2,32E+03	1,95E+06	5,55E+05	3,25E+03
3_3						
	0,025	3,98E+03	2,88E+04	1,02E+08	4,40E+07	1,82E+05
	0,075	2,06E+03	1,49E+04	5,33E+07	2,29E+07	9,33E+04
	0,175	488	3,54E+03	1,28E+07	4,72E+06	2,18E+04
	0,275	73	532,661	1,96E+06	5,55E+05	3,25E+03
3_4						
	0,025	1,96E+06	1,24E+07	2,99E+09	1,36E+10	2,03E+07
	0,075	1,54E+06	9,67E+06	2,21E+09	9,88E+09	1,59E+07
	0,175	1,02E+06	6,37E+06	1,30E+09	5,13E+09	1,06E+07
	0,275	6,76E+05	4,19E+06	7,22E+08	2,57E+09	7,09E+06
3_5						
	0,025	5,72E+05	3,88E+06	2,96E+09	1,34E+10	5,45E+06
	0,075	4,43E+05	3,00E+06	2,17E+09	9,30E+09	4,23E+06
	0,175	2,84E+05	1,92E+06	1,27E+09	4,83E+09	2,73E+06
	0,275	1,79E+05	1,20E+06	6,97E+08	2,41E+09	1,72E+06
3_6						
	0,025	1,19E+05	8,41E+05	2,94E+09	1,32E+10	1,05E+06
	0,075	9,01E+04	6,52E+05	2,15E+09	9,63E+09	8,01E+05
	0,175	5,58E+04	4,03E+05	1,25E+09	5,02E+09	4,97E+05
	0,275	3,31E+04	2,38E+05	6,83E+08	2,52E+09	2,96E+05
3_7						
	0,025	2,46E+06	1,53E+07	3,47E+09	2,39E+12	2,58E+07
	0,075	1,86E+06	1,16E+07	2,38E+09	1,68E+12	1,96E+07
	0,175	1,13E+06	6,96E+06	1,25E+09	8,32E+11	1,21E+07
	0,275	6,54E+05	3,96E+06	6,20E+08	4,26E+11	7,06E+06

Taulukko 5. Geometriavariaatioiden ja kuormitustapauksien kestoajat

Geometria		DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB = 1	DOB = 1/2
	ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
3_8						
	0,025	6,90E+05	4,66E+06	3,43E+09	2,31E+12	6,60E+06
	0,075	5,08E+05	3,42E+06	2,32E+09	1,61E+12	4,87E+06
	0,175	2,93E+05	1,96E+06	1,21E+09	8,05E+11	2,83E+06
	0,275	1,60E+05	1,06E+06	5,99E+08	4,15E+11	1,55E+06
3_9						
	0,025	1,40E+05	1,01E+06	3,41E+09	2,25E+12	1,24E+06
	0,075	9,96E+04	7,19E+05	2,30E+09	1,57E+12	8,86E+05
	0,175	5,50E+04	3,96E+05	1,19E+09	7,85E+11	4,91E+05
	0,275	2,86E+04	2,06E+05	5,88E+08	4,04E+11	2,56E+05

Taulukko 6. Geometriavariaatioiden ja kuormitustapauksien kestoajat

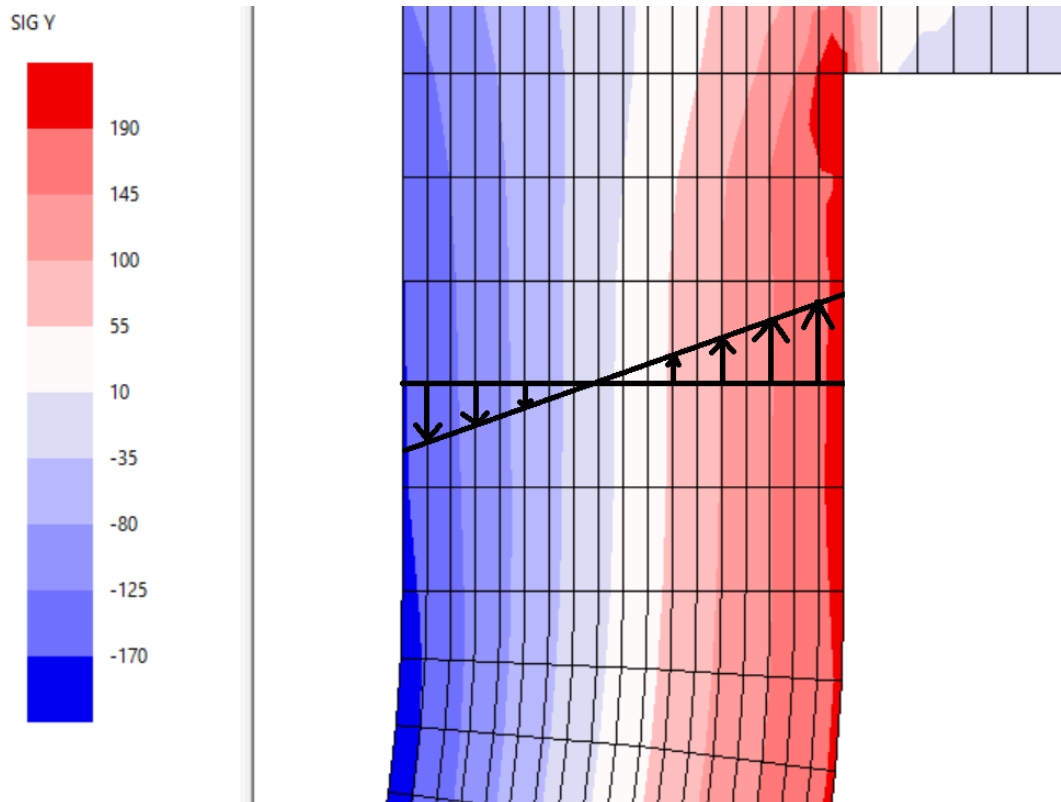
Geometria		DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB = 1	DOB = - 1/2
	ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
3_1						
	0,025	3,2	5,9	36,9	28,0	7,1
	0,075	2,6	4,7	29,8	22,5	5,6
	0,175	1,6	2,9	18,5	13,3	3,4
	0,275	0,8	1,5	9,9	6,5	1,8
3_2						
	0,025	2,1	4,0	35,3	28,0	4,5
	0,075	1,7	3,2	28,6	22,5	3,2
	0,175	1,0	2,0	17,6	13,3	2,2
	0,275	0,6	1,1	9,2	6,5	1,2
3_3						
	0,025	1,3	2,4	37,0	28,0	4,5
	0,075	1,0	2,0	29,9	22,5	3,6
	0,175	0,6	1,2	18,6	13,3	2,2
	0,275	0,3	0,6	9,9	6,5	1,2
3_4						
	0,025	9,9	18,3	114,3	189,4	21,6
	0,075	9,2	16,9	103,3	170,3	20,0
	0,175	8,0	14,7	86,6	136,9	17,4
	0,275	7,0	12,8	71,2	108,7	15,2

Taulukko 6. Geometriavariaatioiden ja kuormitustapauksien kestoajat

Geometria		DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB = 1	DOB = - 1/2
	ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
3_5						
	0,025	6,6	12,5	113,9	188,5	14,0
	0,075	6,1	11,4	102,7	166,9	12,8
	0,175	5,2	9,9	85,9	134,1	11,0
	0,275	4,5	8,4	70,4	106,5	9,5
3_6						
	0,025	9,9	18,3	114,3	187,7	21,6
	0,075	9,2	16,9	103,3	168,9	20,0
	0,175	8,0	14,7	86,6	135,9	17,4
	0,275	7,0	12,8	71,2	108,1	15,2
3_7						
	0,025	10,7	19,7	120,2	1061	23,4
	0,075	9,8	17,9	105,9	942,9	21,4
	0,175	8,3	15,2	85,4	746,5	18,2
	0,275	6,9	12,6	67,7	597,4	15,2
3_8						
	0,025	7,0	13,3	119,7	1049	14,9
	0,075	6,3	12,0	105,1	931,0	13,5
	0,175	5,3	9,9	84,6	738,3	11,2
	0,275	4,3	8,1	66,9	591,9	9,2
3_9						
	0,025	4,1	8,0	119,4	1131	8,5
	0,075	3,7	7,1	104,7	933,4	7,6
	0,175	3,0	5,8	84,1	742,8	6,3
	0,275	2,4	4,7	66,5	594,0	5,0

4.2 Puolisymmetrinen kappale

FAT-luokan määrittämiseksi on pitänyt määrittää kuormituksesta aiheutunut rakenteellinen jännitys kappaleeseen. Rakenteellinen jännityksen määrityskohta on valittu alapuolisen pyöristyksen yläpuolelta. Kuvassa 14 on esitetty kyseisen kohdan y-suuntainen jännitysjaakauma.



Kuva 14. Tarkastelukohdan y-suuntainen jännitysjaakauma

Kuvasta nähdään, että vasemmalla reunalla vaikuttaa noin -170 MPa jännitys alaspäin ja oikealla reunalla vaikuttaa noin 190 MPa jännitys ylöspäin. Oikean puoleista jännitystä, joka aiheuttaa hitsin rajapinnalle vetojännityksen on käytetty rakenteellisena jännityksenä, kun FAT-luokkaa on määritetty. Taulukossa 7 on esitetty kolme rakenteelle laskettua kestoikää ja FAT-luokkaa. Loput tulokset ja tarkempi laskenta on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 7. Puolisymmetrisen kappaleen kestoiät ja FAT-luokat

ai (mm)	N(ai) (sykliä)	FAT (ai)
0.025	7.613e3	29.7
0.075	6.851e3	28.6
0.175	5.792e3	27.1
0.275	4.919e3	25.6

5 TULOSTEN TARKASTELU

Tehdyissä analyyseissä on selvitetty käytettyjen paikallisgeometrioiden ja käytettyjen kuormitustyyppien vaikutusta liitoksen väsymiskestävyyteen.

5.1 Kuormitustyyppien vaikutus

Tuloksista havaitaan, että puhdas vetokuormitus on kappaleille kriittisin kuormitustapa. Puhtaat taivutukset osoittautuivat vähiten kriittisimmiksi, joista $DOB = 1$ on vähiten kriittisin suurimmissa hitsin syvyyksissä ja $DOB = -1$ muissa tapauksissa. $DOB = 1$ on ainut kuormitustapaus, jossa murtuminen alkoi hitsin juuresta. Hitsin tunkeuman kasvattaminen myös pienensi merkittävästi hitsin juureen syntynyttä jännityskeskittymää, mikä kasvattaa merkittävästi rakenteen kestoikää, kun kuormitustapauksena oli $DOB = 1$. Tapaukset, jotka olivat vedon ja taivutuksen yhdistelmiä ovat vähemmän kriittisiä kuin puhdas vetokuormitus, mutta kriittisempiä kuin puhtaat taivutuskuormitukset. Näistä yhdistelmistä kriittisempi oli $DOB = -1/2$.

5.2 Geometriamuutosten vaikutus

Tuloksista nähdään, että kun levyn taivutussädettä kasvatetaan, niin samalla myös kestoikä pienenee, koska kuormituksen ja hitsin välinen momenttivarso kasvaa. Tällöin hitsiin syntyy suurempi momentti, joka aiheuttaa täten suuremman jännityksen hitsiin. Suurimmat kestoiät siis saadaan, kun taivutussäde on mahdollisimman pieni. Malleissa käytetyistä hitsin pituuksista pienin oli puolet ainevahvuudesta ja muissa tapauksissa pituus oli ainevahvuutta

suurempi. Rakenteen murtuminen noudattaa lyhyimmän reitin periaatetta, joten tapauksissa joissa hitsin pituus on ainevahvuutta pienempi, särö kulkee hitsin pituuden läpi ja tapauksissa joissa hitsin pituus on ainevahvuutta suurempi, särö kulkee ainevahvuuden läpi. Pienimmällä hitsin pituudella kestoiät ovat huomattavasti pienemmät, kuin muilla hitsin pituuksilla. Pisimmällä ja toiseksi pisimmällä hitsin pituudella ei ole merkittäviä eroja rakenteen kestoiässä, joista kumminkin pidemmällä kestoikä on parempi. Hitsin syvyyden kasvattaminen kasvattaa kuitenkin aina rakenteen kestoikää, mutta se ei kasvata rakenteen kestoikää merkittävästi, kun hitsin pituus on saavuttanut ainevahvuuden, koska hitsin kasvattaminen pienentää vain hieman hitsin reunapinnan jännityshuippuja.

5.3 Puolisymmetrisen kappaleen tulosten tarkastelu

Kuvasta 12 voidaan nähdä, että rakenne on taivutuksella tarkasteltavassa kohdassa. Parametrisoiduissa malleissa jännitys jakauma on lähimpänä $DOB = -1$ kuormitustapausta. Kun särö on 0.025 mm kappaleen kestoiäksi saatiin 7613 sykliä ja FAT-luokaksi noin 29.7, kun rakenteelliseksi jännitykseksi oltiin asetettu kuvan 14 mukaisesti 190 MPa. Tämä kestoikä on selvästi pienempi kuin laboratoriossa saatu 143232 sykliä, vaikka käytetty kuormitus on asetettu vastamaan laboratoriossa käytettyä kuormitusta. Parametrisoidussa liitoksessa ainevahvuus oli kolme kertaa pienempi, mutta pienin saatu FAT-luokka parametrisoidussa liitoksessa särön ollessa 0.025 mm oli $DOB = -1$ tapauksissa noin 35.3. Parametrisoidussa liitoksessa valittiin ”worst-case” -tapaus, jossa reunaehdot eivät vastannut laboratorion väsytykskokeessa ollutta jäykkää alustaa. Tämä osittain selittää parametrisoidun liitoksen heikompia kestoikiä verrattuna laboratorion väsytykskokeissa saatuihin tuloksiin.

6 YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää rakenteen ja sen liitoksen mahdollisten variaatioiden kestoiät ja FAT-luokat. Kestoiät ja FAT-luokat selvitettiin viidellä erilaisella taiputusasteisella kuormituksella. FE –analyysit suoritettiin Franc2D-ohjelmalla, jolla ratkaistiin särön intensiteettikertoimet. Intensiteettikertoimien ja asetetun kuormituksen avulla laskettiin MathCad-ohjelmaa hyväksi käyttäen rakenteen kestoiät ja FAT-luokat. Saaduista tuloksista tullaan tekemään työkalukäyrästä, jolla voidaan analysoida jatkossa vastaavia liitoksia. Edellisen lisäksi mallinnettiin yhdestä laboratoriokappaleesta puolisyymetrinen malli, jolle tehtiin vastaavat FE –analyysit ja laskennat kuin parametrisoiduille malleille. Puolisymmetrisen mallin kestoikää verrattiin laboratoriokokeissa saatuihin tuloksiin.

Parametrisoiduissa malleissa huomattiin, että vetokuormituksessa rakenteen kestoikä osoittautui heikoimmaksi kaikissa geometrisissä variaatioissa. Puolisymmetrisessä mallissa kuitenkin havaittiin, että rakenteen kohdistuva kuormitus aiheuttaa todellisuudessa rakenteen tarkasteltavaan kohtaan lähestulkoon $DOB = -1$ kaltaisen rakenteellisen jännityksen. Normaalisissa kappaleen rasituksessa tarkasteltavaan kohtaan ei siis synny puhdasta vetokuormitusta, joten todellisen rakenteen kestoiän ja FAT-luokan määrittämiseen on perusteltua käyttää $DOB = -1$ kuormitustapausta. Tässä tutkimuksessa määräävänä kuormitustapana pidetään kuitenkin puhdasta vetokuormitusta. Hitsin rajapinta osoittautui rakenteen kriittisimmäksi kohdaksi kaikissa muissa kuormitustapauksissa lukuun ottamatta kuormitustapausta $DOB = 1$, jolloin rakenteen kriittisin kohta oli hitsin juuri. Taivutussäteen kasvattaminen heikensi myös rakenteen kestoikää kaikissa kuormitustapauksissa, johtuen momenttivarren kasvusta. Hitsin syvyyden kasvattaminen paransi rakenteen kestoikää, erityisesti silloin kun hitsin syvyys oli pienempi kuin ainevahvuus. Saatujen tulosten perusteella voidaan tehdä selvä johtopäätös, että vetokuormitustapaukset määrittävät rakenteen FAT-luokan.

Laboratoriokappaleissa käytettiin kahdessa kappaleessa 10 kN vaihtelevaa kuormitusta, mikä vastaa puolisyymetrissä mallissa käytettyä rasitusta. Ensimmäisessä KO_4 tapauksessa rakenne kesti 143232 sykliä ja toisessa KO_6 tapauksessa 35874 sykliä.

Ensimmäinen tapaus kesti melkein neljä kertaa enemmän syklejä kuin jälkimmäinen tapaus. Kuitenkin molemmat koekappaleet kestivät huomattavasti enemmän kuormituskertoja kuin mallinnettu puolisyymetrinen malli, joka kesti laskennallisesti 7613 sykliä, kun alkusärö oli 0.025 mm. Puolisymmetrisen mallin mitat saatiin KO_4 rakenteesta otetuista makrokuvista, minkä takia mitoissa saattaa esiintyä pieniä eroavaisuuksia. Saaduista laboratoriokoekappaleiden tuloksista voidaan päätellä, että pienetkin eroavaisuudet voivat aiheuttaa merkittäviä eroja rakenteen kestoikään. Hitsin syvyys ja taivutusaste oli vaikea määrittää kuvista tarkasti ja tutkimuksessa on todettu aikaisemmin, että näissä kohdissa olevat eroavaisuudet saattavat vaikuttaa rakenteen kestoikään merkittävästi. Edellä mainittu voi osittain selittää puolisyymetrisen mallin heikomman kestoiän, jos taivutusaste on ollut puolisyymetrisessä mallissa todellista suurempi tai hitsin syvyys on ollut todellista pienempi.

LÄHTEET

Dowling, N. E. 2007. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 1. Painos. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall cop. 912 s.

Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. 164 s.

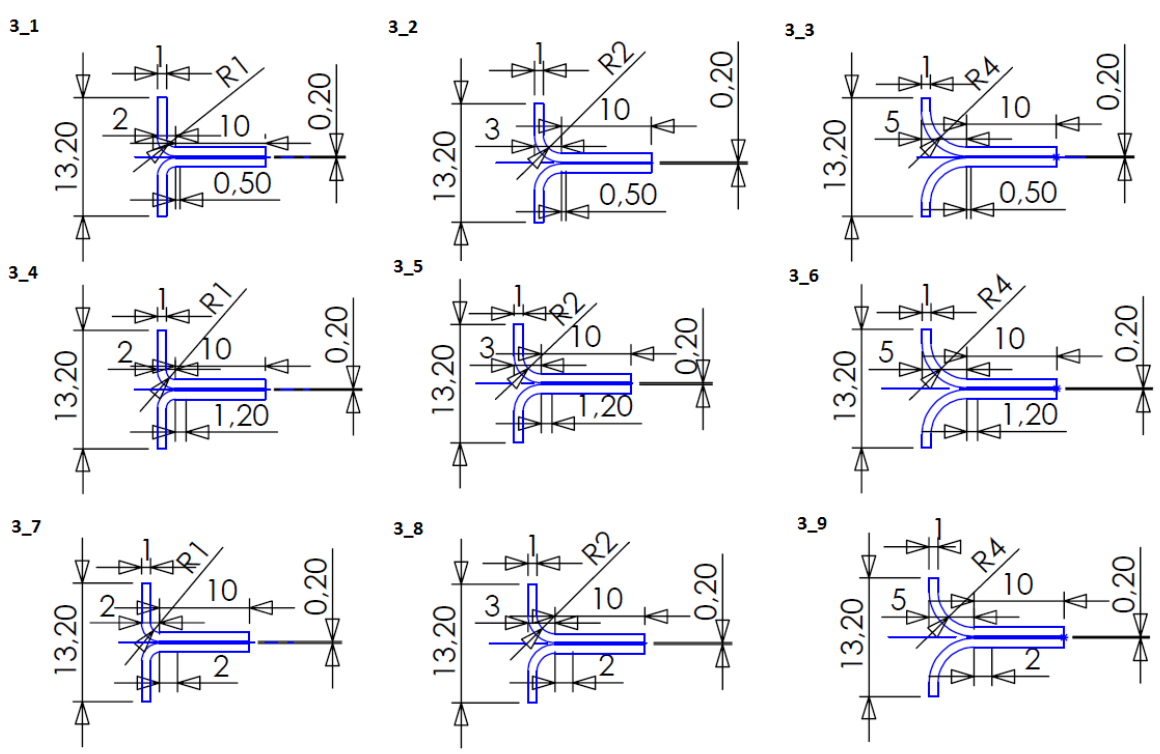
Ikonen, K. & Kantola, K. 1986. Murtumismekaniikka 2. painos Espoo: Otakustantamo. 381 s.

Niemi, E. & Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. 5. painos. Helsinki: Painatuskeskus. s. 337

Pennala, E. 2002. Lujuusopin perusteet. 6. painos. Espoo: Otatieto. 400 s.

SFS-EN 1993-1-9. 2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Teräsrakenteiden väsyminen. Suomen standarditoimistoliitto SFS. 42 s.

Geometriavariaatiot



Mallinnettujen liitosten yksityiskohtainen laskentakaava kestoi'ille ja FAT-luokille

Lappeenranta University of Technology
Steel structures

data :=

\\...\1_1_0.txt

points := rows(data)

points = 20

adata := data⁽⁰⁾

Kdata := data⁽¹⁾

Särön alkupituus:

Alustava K1-arvo

aii := data_{0,0} aii := 0.025

Kii := Kdata_{0,0} Kii = 231.729

Särön loppupituus

Lopullinen K1-arvo

aff := data_{points-1,0} aff = 1.325

Kff := Kdata_{points-1,0} Kff = 6.663×10^3

Särön kasvuaskeleet

K1-arvot

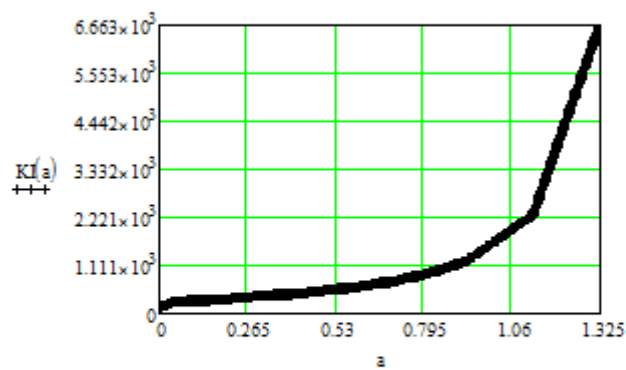
	0
0	0.025
1	0.038
2	0.05
3	0.075
4	0.1
5	0.125
6	0.15
adata = 7	0.175
8	0.225
9	0.275
10	0.325
11	0.375
12	0.425
13	0.525
14	0.625
15	...

	0
0	231.729
1	260.964
2	271.395
3	288.037
4	303.176
5	317.348
6	330.577
Kdata = 7	343.606
8	368.606
9	394.725
10	421.925
11	451.332
12	484.716
13	561.455
14	659.579
15	...

Mallinnettujen liitosten yksityiskohtainen laskentakaava kestoille ja FAT-luokille

Kuvaajaa K1-arvoista särön kasvaessa

$KI(a) := \text{linterp}(adata, Kdata, a)$



$C := 3.0 \cdot 10^{-13}$ $m := 3$ $da := 0.01$ $ai := aii, aii + da .. aif$

Paris
yhtälö:

$$N1(ai) := \int_{ai}^{aif} \frac{1}{KI(a)^m \cdot C} da \quad N1(aif) = 3.792 \times 10^4$$

Kestoikä jokaiselle särön pituudelle

$N1(ai) =$	$ai =$
$3.792 \cdot 10^4$	0.025
$3.56 \cdot 10^4$	0.035
$3.376 \cdot 10^4$	0.045
$3.209 \cdot 10^4$	0.055
$3.054 \cdot 10^4$	0.065
$2.909 \cdot 10^4$	0.075
$2.774 \cdot 10^4$	0.085
$2.647 \cdot 10^4$	0.095
$2.527 \cdot 10^4$	0.105
$2.414 \cdot 10^4$	0.115
$2.307 \cdot 10^4$	0.125
$2.205 \cdot 10^4$	0.135
$2.108 \cdot 10^4$	0.145
$2.016 \cdot 10^4$	0.155
$1.928 \cdot 10^4$	0.165
...	...

Mallinnettujen liitosten yksityiskohtainen laskentakaava kestoille ja FAT-luokille

Väsymiskestävyyden FAT-luokka

$\sigma := 10$ rakenteellinen jännitys

$$\text{FAT}(a_i) := \sigma \cdot \sqrt[3]{\frac{N1(a_i)}{2 \cdot 10^6}}$$

FAT-luokka jokaiselle särön pituudelle

FAT(a_i) =

a_i =

2.667	0.025
2.611	0.035
2.565	0.045
2.522	0.055
2.481	0.065
2.441	0.075
2.403	0.085
2.365	0.095
2.329	0.105
2.294	0.115
2.259	0.125
2.226	0.135
2.193	0.145
2.16	0.155
2.128	0.165
...	...

+

[1] Niu X. and Glinka G., Stress-intensity factors for semi-elliptical surface cracks in welded joints, International Journal of Fracture, 40, pp. 225-270, 1989

Kestoiät

3_1					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	6,73E+04	4,19E+05	1,01E+08	4,40E+07	7,09E+05
0,035	5,81E+04	3,62E+05	8,76E+07	3,88E+07	6,12E+05
0,045	5,08E+04	3,16E+05	7,72E+07	3,42E+07	5,34E+05
0,055	4,45E+04	2,77E+05	6,81E+07	3,00E+07	4,68E+05
0,065	3,90E+04	2,43E+05	6,00E+07	2,62E+07	4,09E+05
0,075	3,41E+04	2,12E+05	5,28E+07	2,29E+07	3,57E+05
0,085	2,97E+04	1,86E+05	4,64E+07	1,99E+07	3,12E+05
0,095	2,59E+04	1,62E+05	4,07E+07	1,73E+07	2,72E+05
0,105	2,25E+04	1,41E+05	3,56E+07	1,49E+07	2,36E+05
0,115	1,96E+04	1,22E+05	3,10E+07	1,28E+07	2,05E+05
0,125	1,69E+04	1,06E+05	2,70E+07	1,10E+07	1,77E+05
0,135	1,46E+04	9,15E+04	2,34E+07	9,36E+06	1,53E+05
0,145	1,26E+04	7,87E+04	2,02E+07	7,95E+06	1,32E+05
0,155	1,08E+04	6,75E+04	1,74E+07	6,72E+06	1,13E+05
0,165	9,21E+03	5,77E+04	1,49E+07	5,65E+06	9,64E+04
0,175	7,83E+03	4,91E+04	1,27E+07	4,72E+06	8,19E+04
0,185	6,64E+03	4,16E+04	1,08E+07	3,93E+06	6,94E+04
0,195	5,61E+03	3,52E+04	9,18E+06	3,26E+06	5,86E+04
0,205	4,72E+03	2,96E+04	7,75E+06	2,69E+06	4,93E+04
0,215	3,95E+03	2,47E+04	6,50E+06	2,21E+06	4,12E+04
0,225	3,27E+03	2,05E+04	5,40E+06	1,79E+06	3,41E+04
0,235	2,69E+03	1,69E+04	4,45E+06	1,44E+06	2,80E+04
0,245	2,21E+03	1,38E+04	3,67E+06	1,15E+06	2,30E+04
0,255	1,80E+03	1,13E+04	3,00E+06	9,16E+05	1,88E+04
0,265	1,46E+03	9,13E+03	2,43E+06	7,20E+05	1,52E+04
0,275	1,16E+03	7,27E+03	1,94E+06	5,55E+05	1,21E+04
0,285	914,537	5,74E+03	1,54E+06	4,23E+05	9,52E+03
0,295	719,225	4,51E+03	1,21E+06	3,22E+05	7,49E+03
0,305	560,795	3,52E+03	9,49E+05	2,43E+05	5,84E+03

Kestoiät

3_2					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	1,91E+04	1,29E+05	1,01E+08	4,40E+07	1,82E+05
0,035	1,65E+04	1,12E+05	8,81E+07	3,88E+07	1,58E+05
0,045	1,45E+04	9,80E+04	7,76E+07	3,42E+07	1,38E+05
0,055	1,27E+04	8,61E+04	6,85E+07	3,00E+07	1,21E+05
0,065	1,12E+04	7,56E+04	6,04E+07	2,62E+07	1,07E+05
0,075	9,78E+03	6,62E+04	5,31E+07	2,29E+07	9,33E+04
0,085	8,56E+03	5,80E+04	4,67E+07	1,99E+07	8,16E+04
0,095	7,48E+03	5,06E+04	4,09E+07	1,73E+07	7,13E+04
0,105	6,52E+03	4,41E+04	3,58E+07	1,49E+07	6,21E+04
0,115	5,67E+03	3,84E+04	3,12E+07	1,28E+07	5,40E+04
0,125	4,92E+03	3,33E+04	2,72E+07	1,10E+07	4,69E+04
0,135	4,26E+03	2,88E+04	2,35E+07	9,36E+06	4,05E+04
0,145	3,67E+03	2,48E+04	2,04E+07	7,95E+06	3,49E+04
0,155	3,15E+03	2,13E+04	1,75E+07	6,72E+06	3,00E+04
0,165	2,69E+03	1,82E+04	1,50E+07	5,65E+06	2,56E+04
0,175	2,29E+03	1,55E+04	1,28E+07	4,72E+06	2,18E+04
0,185	1,94E+03	1,32E+04	1,09E+07	3,93E+06	1,85E+04
0,195	1,64E+03	1,12E+04	9,23E+06	3,26E+06	1,56E+04
0,205	1,38E+03	9,39E+03	7,79E+06	2,69E+06	1,32E+04
0,215	1,16E+03	7,86E+03	6,53E+06	2,21E+06	1,10E+04
0,225	960,141	6,52E+03	5,43E+06	1,79E+06	9,13E+03
0,235	790,809	5,37E+03	4,48E+06	1,44E+06	7,52E+03
0,245	649,567	4,41E+03	3,68E+06	1,15E+06	6,18E+03
0,255	530,527	3,60E+03	3,02E+06	9,16E+05	5,05E+03
0,265	429,274	2,91E+03	2,44E+06	7,20E+05	4,08E+03
0,275	342,285	2,32E+03	1,95E+06	5,55E+05	3,25E+03
0,285	270,6	1,84E+03	1,55E+06	4,23E+05	2,57E+03
0,295	213,104	1,45E+03	1,22E+06	3,22E+05	2,03E+03
0,305	166,409	1,13E+03	9,56E+05	2,43E+05	1,58E+03

Kestoiät

3_3					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	36,992	2,88E+04	1,02E+08	4,40E+07	1,82E+05
0,035	3,98E+03	2,50E+04	8,83E+07	3,88E+07	1,58E+05
0,045	3,45E+03	2,20E+04	7,78E+07	3,42E+07	1,38E+05
0,055	3,03E+03	1,93E+04	6,87E+07	3,00E+07	1,21E+05
0,065	2,67E+03	1,70E+04	6,05E+07	2,62E+07	1,07E+05
0,075	2,35E+03	1,49E+04	5,33E+07	2,29E+07	9,33E+04
0,085	2,06E+03	1,31E+04	4,68E+07	1,99E+07	8,16E+04
0,095	1,81E+03	1,14E+04	4,11E+07	1,73E+07	7,13E+04
0,105	1,58E+03	9,98E+03	3,59E+07	1,49E+07	6,21E+04
0,115	1,38E+03	8,69E+03	3,13E+07	1,28E+07	5,40E+04
0,125	1,20E+03	7,55E+03	2,72E+07	1,10E+07	4,69E+04
0,135	1,04E+03	6,53E+03	2,36E+07	9,36E+06	4,05E+04
0,145	901,982	5,64E+03	2,04E+07	7,95E+06	3,49E+04
0,155	778,415	4,85E+03	1,76E+07	6,72E+06	3,00E+04
0,165	669,014	4,15E+03	1,51E+07	5,65E+06	2,56E+04
0,175	572,846	3,54E+03	1,28E+07	4,72E+06	2,18E+04
0,185	488,039	3,00E+03	1,09E+07	3,93E+06	1,85E+04
0,195	414,193	2,54E+03	9,25E+06	3,26E+06	1,56E+04
0,205	350,643	2,14E+03	7,81E+06	2,69E+06	1,32E+04
0,215	295,562	1,79E+03	6,55E+06	2,21E+06	1,10E+04
0,225	247,51	1,49E+03	5,44E+06	1,79E+06	9,13E+03
0,235	205,338	1,23E+03	4,49E+06	1,44E+06	7,52E+03
0,245	169,27	1,01E+03	3,70E+06	1,15E+06	6,18E+03
0,255	139,149	824,239	3,02E+06	9,16E+05	5,05E+03
0,265	113,735	667,464	2,45E+06	7,20E+05	4,08E+03
0,275	92,098	532,661	1,96E+06	5,55E+05	3,25E+03
0,285	73,493	421,476	1,55E+06	4,23E+05	2,57E+03
0,295	58,149	332,224	1,23E+06	3,22E+05	2,03E+03
0,305	45,832	259,686	9,59E+05	2,43E+05	1,58E+03

Kestoiät

3_4					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	1,96E+06	1,24E+07	2,99E+09	1,36E+10	2,03E+07
0,035	1,84E+06	1,16E+07	2,75E+09	1,28E+10	1,90E+07
0,045	1,76E+06	1,11E+07	2,59E+09	1,20E+10	1,82E+07
0,055	1,68E+06	1,06E+07	2,45E+09	1,12E+10	1,74E+07
0,065	1,61E+06	1,01E+07	2,33E+09	1,05E+10	1,66E+07
0,075	1,54E+06	9,67E+06	2,21E+09	9,88E+09	1,59E+07
0,085	1,47E+06	9,27E+06	2,10E+09	9,27E+09	1,53E+07
0,095	1,41E+06	8,88E+06	1,99E+09	8,69E+09	1,46E+07
0,105	1,36E+06	8,52E+06	1,89E+09	8,15E+09	1,40E+07
0,115	1,30E+06	8,17E+06	1,79E+09	7,63E+09	1,35E+07
0,125	1,25E+06	7,84E+06	1,70E+09	7,15E+09	1,29E+07
0,135	1,20E+06	7,52E+06	1,61E+09	6,69E+09	1,24E+07
0,145	1,15E+06	7,22E+06	1,53E+09	6,27E+09	1,19E+07
0,155	1,11E+06	6,92E+06	1,45E+09	5,86E+09	1,15E+07
0,165	1,06E+06	6,64E+06	1,37E+09	5,49E+09	1,10E+07
0,175	1,02E+06	6,37E+06	1,30E+09	5,13E+09	1,06E+07
0,185	9,78E+05	6,12E+06	1,23E+09	4,80E+09	1,02E+07
0,195	9,39E+05	5,87E+06	1,16E+09	4,48E+09	9,77E+06
0,205	9,02E+05	5,63E+06	1,10E+09	4,19E+09	9,39E+06
0,215	8,66E+05	5,40E+06	1,04E+09	3,91E+09	9,02E+06
0,225	8,31E+05	5,18E+06	9,79E+08	3,65E+09	8,67E+06
0,235	7,98E+05	4,96E+06	9,23E+08	3,41E+09	8,33E+06
0,245	7,66E+05	4,76E+06	8,69E+08	3,18E+09	8,00E+06
0,255	7,35E+05	4,56E+06	8,18E+08	2,96E+09	7,68E+06
0,265	7,05E+05	4,37E+06	7,69E+08	2,76E+09	7,38E+06
0,275	6,76E+05	4,19E+06	7,22E+08	2,57E+09	7,09E+06
0,285	6,49E+05	4,01E+06	6,78E+08	2,39E+09	6,81E+06
0,295	6,22E+05	3,84E+06	6,35E+08	2,22E+09	6,53E+06
0,305	5,96E+05	3,68E+06	5,95E+08	2,07E+09	6,27E+06

Kestoiät

3_5					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	5,72E+05	3,88E+06	2,96E+09	1,34E+10	5,45E+06
0,035	5,34E+05	3,62E+06	2,71E+09	1,21E+10	5,09E+06
0,045	5,08E+05	3,44E+06	2,55E+09	1,13E+10	4,85E+06
0,055	4,85E+05	3,28E+06	2,42E+09	1,06E+10	4,63E+06
0,065	4,63E+05	3,14E+06	2,29E+09	9,92E+09	4,42E+06
0,075	4,43E+05	3,00E+06	2,17E+09	9,30E+09	4,23E+06
0,085	4,24E+05	2,87E+06	2,06E+09	8,73E+09	4,05E+06
0,095	4,05E+05	2,74E+06	1,95E+09	8,18E+09	3,87E+06
0,105	3,88E+05	2,62E+06	1,85E+09	7,67E+09	3,71E+06
0,115	3,71E+05	2,51E+06	1,75E+09	7,18E+09	3,55E+06
0,125	3,55E+05	2,40E+06	1,66E+09	6,73E+09	3,40E+06
0,135	3,40E+05	2,29E+06	1,58E+09	6,30E+09	3,25E+06
0,145	3,25E+05	2,19E+06	1,49E+09	5,90E+09	3,11E+06
0,155	3,11E+05	2,10E+06	1,41E+09	5,52E+09	2,98E+06
0,165	2,97E+05	2,01E+06	1,34E+09	5,16E+09	2,85E+06
0,175	2,84E+05	1,92E+06	1,27E+09	4,83E+09	2,73E+06
0,185	2,72E+05	1,83E+06	1,20E+09	4,51E+09	2,61E+06
0,195	2,60E+05	1,75E+06	1,13E+09	4,22E+09	2,50E+06
0,205	2,48E+05	1,67E+06	1,07E+09	3,94E+09	2,39E+06
0,215	2,37E+05	1,59E+06	1,01E+09	3,68E+09	2,28E+06
0,225	2,26E+05	1,52E+06	9,49E+08	3,43E+09	2,18E+06
0,235	2,16E+05	1,45E+06	8,94E+08	3,20E+09	2,08E+06
0,245	2,06E+05	1,38E+06	8,41E+08	2,99E+09	1,99E+06
0,255	1,97E+05	1,32E+06	7,91E+08	2,78E+09	1,90E+06
0,265	1,87E+05	1,26E+06	7,43E+08	2,59E+09	1,81E+06
0,275	1,79E+05	1,20E+06	6,97E+08	2,41E+09	1,72E+06
0,285	1,70E+05	1,14E+06	6,54E+08	2,25E+09	1,64E+06
0,295	1,62E+05	1,08E+06	6,12E+08	2,09E+09	1,57E+06
0,305	1,54E+05	1,03E+06	5,73E+08	1,94E+09	1,49E+06

Kestoiät

3_6					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	1,19E+05	8,41E+05	2,94E+09	1,32E+10	1,05E+06
0,035	1,10E+05	7,96E+05	2,69E+09	1,24E+10	9,78E+05
0,045	1,04E+05	7,55E+05	2,53E+09	1,17E+10	9,27E+05
0,055	9,93E+04	7,18E+05	2,40E+09	1,09E+10	8,82E+05
0,065	9,46E+04	6,84E+05	2,27E+09	1,03E+10	8,40E+05
0,075	9,01E+04	6,52E+05	2,15E+09	9,63E+09	8,01E+05
0,085	8,59E+04	6,21E+05	2,04E+09	9,04E+09	7,64E+05
0,095	8,19E+04	5,92E+05	1,93E+09	8,47E+09	7,28E+05
0,105	7,81E+04	5,65E+05	1,83E+09	7,95E+09	6,95E+05
0,115	7,45E+04	5,38E+05	1,74E+09	7,45E+09	6,63E+05
0,125	7,11E+04	5,13E+05	1,64E+09	6,98E+09	6,32E+05
0,135	6,77E+04	4,89E+05	1,56E+09	6,54E+09	6,03E+05
0,145	6,46E+04	4,66E+05	1,47E+09	6,13E+09	5,74E+05
0,155	6,15E+04	4,44E+05	1,40E+09	5,73E+09	5,47E+05
0,165	5,86E+04	4,23E+05	1,32E+09	5,37E+09	5,21E+05
0,175	5,58E+04	4,03E+05	1,25E+09	5,02E+09	4,97E+05
0,185	5,31E+04	3,83E+05	1,18E+09	4,70E+09	4,73E+05
0,195	5,05E+04	3,64E+05	1,11E+09	4,39E+09	4,50E+05
0,205	4,80E+04	3,46E+05	1,05E+09	4,10E+09	4,28E+05
0,215	4,56E+04	3,29E+05	9,91E+08	3,83E+09	4,06E+05
0,225	4,33E+04	3,12E+05	9,33E+08	3,58E+09	3,86E+05
0,235	4,11E+04	2,96E+05	8,78E+08	3,34E+09	3,66E+05
0,245	3,90E+04	2,81E+05	8,26E+08	3,12E+09	3,48E+05
0,255	3,69E+04	2,66E+05	7,76E+08	2,91E+09	3,30E+05
0,265	3,50E+04	2,52E+05	7,29E+08	2,71E+09	3,12E+05
0,275	3,31E+04	2,38E+05	6,83E+08	2,52E+09	2,96E+05
0,285	3,13E+04	2,25E+05	6,40E+08	2,35E+09	2,80E+05
0,295	2,96E+04	2,13E+05	5,99E+08	2,19E+09	2,64E+05
0,305	2,79E+04	2,01E+05	5,60E+08	2,03E+09	2,50E+05

Kestoiät

3_7					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	2.459e6	1,53E+07	3,47E+09	2,39E+12	2,58E+07
0,035	2.284e6	1,42E+07	3,10E+09	2,23E+12	2,40E+07
0,045	2.166e6	1,35E+07	2,89E+09	2,07E+12	2,28E+07
0,055	2.059e6	1,28E+07	2,70E+09	1,93E+12	2,17E+07
0,065	1.959e6	1,22E+07	2,53E+09	1,80E+12	2,06E+07
0,075	1.864e6	1,16E+07	2,38E+09	1,68E+12	1,96E+07
0,085	1.775e6	1,10E+07	2,23E+09	1,57E+12	1,87E+07
0,095	1.69e6	1,05E+07	2,09E+09	1,46E+12	1,78E+07
0,105	1.609e6	9,96E+06	1,96E+09	1,36E+12	1,70E+07
0,115	1.532e6	9,47E+06	1,84E+09	1,27E+12	1,62E+07
0,125	1.458e6	9,00E+06	1,73E+09	1,18E+12	1,54E+07
0,135	1.387e6	8,56E+06	1,62E+09	1,10E+12	1,47E+07
0,145	1.319e6	8,13E+06	1,52E+09	1,02E+12	1,40E+07
0,155	1.254e6	7,72E+06	1,42E+09	9,55E+11	1,33E+07
0,165	1.192e6	7,33E+06	1,33E+09	8,91E+11	1,27E+07
0,175	1.132e6	6,96E+06	1,25E+09	8,32E+11	1,21E+07
0,185	1.075e6	6,60E+06	1,17E+09	7,77E+11	1,15E+07
0,195	1.02e6	6,25E+06	1,09E+09	7,26E+11	1,09E+07
0,205	9.673e5	5,92E+06	1,02E+09	6,78E+11	1,03E+07
0,215	9.166e5	5,60E+06	9,52E+08	6,34E+11	9,81E+06
0,225	8.679e5	5,30E+06	8,88E+08	5,93E+11	9,30E+06
0,235	8.212e5	5,01E+06	8,27E+08	5,55E+11	8,81E+06
0,245	7.766e5	4,73E+06	7,71E+08	5,19E+11	8,34E+06
0,255	7.338e5	4,46E+06	7,17E+08	4,86E+11	7,90E+06
0,265	6.929e5	4,21E+06	6,67E+08	4,55E+11	7,47E+06
0,275	6.536e5	3,96E+06	6,20E+08	4,26E+11	7,06E+06
0,285	6.161e5	3,73E+06	5,76E+08	3,99E+11	6,66E+06
0,295	5.803e5	3,51E+06	5,34E+08	3,74E+11	6,29E+06
0,305	5.461e5	3,30E+06	4,95E+08	3,51E+11	5,93E+06

Kestoiät

3_8					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	6,90E+05	4,66E+06	3,43E+09	2,31E+12	6,60E+06
0,035	6,34E+05	4,27E+06	3,05E+09	2,15E+12	6,07E+06
0,045	5,98E+05	4,03E+06	2,83E+09	1,99E+12	5,73E+06
0,055	5,66E+05	3,81E+06	2,65E+09	1,86E+12	5,43E+06
0,065	5,36E+05	3,61E+06	2,48E+09	1,73E+12	5,14E+06
0,075	5,08E+05	3,42E+06	2,32E+09	1,61E+12	4,87E+06
0,085	4,81E+05	3,24E+06	2,18E+09	1,51E+12	4,62E+06
0,095	4,56E+05	3,06E+06	2,04E+09	1,41E+12	4,38E+06
0,105	4,32E+05	2,90E+06	1,91E+09	1,31E+12	4,15E+06
0,115	4,09E+05	2,75E+06	1,79E+09	1,22E+12	3,94E+06
0,125	3,88E+05	2,60E+06	1,68E+09	1,14E+12	3,73E+06
0,135	3,67E+05	2,46E+06	1,58E+09	1,06E+12	3,53E+06
0,145	3,47E+05	2,33E+06	1,48E+09	9,87E+11	3,35E+06
0,155	3,28E+05	2,20E+06	1,38E+09	9,22E+11	3,17E+06
0,165	3,10E+05	2,08E+06	1,29E+09	8,61E+11	2,99E+06
0,175	2,93E+05	1,96E+06	1,21E+09	8,05E+11	2,83E+06
0,185	2,77E+05	1,85E+06	1,13E+09	7,52E+11	2,67E+06
0,195	2,61E+05	1,75E+06	1,06E+09	7,04E+11	2,52E+06
0,205	2,46E+05	1,65E+06	9,87E+08	6,58E+11	2,38E+06
0,215	2,32E+05	1,55E+06	9,21E+08	6,16E+11	2,25E+06
0,225	2,18E+05	1,46E+06	8,59E+08	5,76E+11	2,11E+06
0,235	2,05E+05	1,37E+06	8,00E+08	5,39E+11	1,99E+06
0,245	1,93E+05	1,29E+06	7,45E+08	5,05E+11	1,87E+06
0,255	1,81E+05	1,21E+06	6,94E+08	4,73E+11	1,76E+06
0,265	1,70E+05	1,13E+06	6,45E+08	4,43E+11	1,65E+06
0,275	1,60E+05	1,06E+06	5,99E+08	4,15E+11	1,55E+06
0,285	1,49E+05	9,94E+05	5,56E+08	3,89E+11	1,45E+06
0,295	1,40E+05	9,30E+05	5,16E+08	3,64E+11	1,36E+06
0,305	1,31E+05	8,69E+05	4,78E+08	3,42E+11	1,27E+06

Kestoiät

3_9					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)	N(ai)
0,025	1,40E+05	1,01E+06	3,41E+09	2,25E+12	1,24E+06
0,035	1,27E+05	9,16E+05	3,02E+09	2,09E+11	1,13E+06
0,045	1,19E+05	8,59E+05	2,81E+09	1,94E+12	1,06E+06
0,055	1,12E+05	8,09E+05	2,62E+09	1,81E+12	9,97E+05
0,065	1,06E+05	7,62E+05	2,45E+09	1,69E+12	9,40E+05
0,075	9,96E+04	7,19E+05	2,30E+09	1,57E+12	8,86E+05
0,085	9,39E+04	6,78E+05	2,15E+09	1,47E+12	8,36E+05
0,095	8,86E+04	6,39E+05	2,01E+09	1,37E+12	7,89E+05
0,105	8,36E+04	6,03E+05	1,89E+09	1,28E+12	7,45E+05
0,115	7,88E+04	5,69E+05	1,77E+09	1,19E+12	7,03E+05
0,125	7,43E+04	5,36E+05	1,66E+09	1,11E+12	6,63E+05
0,135	7,00E+04	5,05E+05	1,55E+09	1,03E+12	6,25E+05
0,145	6,60E+04	4,76E+05	1,45E+09	9,62E+11	5,88E+05
0,155	6,21E+04	4,48E+05	1,36E+09	8,99E+11	5,54E+05
0,165	5,84E+04	4,21E+05	1,27E+09	8,40E+11	5,22E+05
0,175	5,50E+04	3,96E+05	1,19E+09	7,85E+11	4,91E+05
0,185	5,17E+04	3,72E+05	1,11E+09	7,33E+11	4,61E+05
0,195	4,85E+04	3,50E+05	1,04E+09	6,86E+11	4,33E+05
0,205	4,56E+04	3,28E+05	9,70E+08	6,42E+11	4,07E+05
0,215	4,27E+04	3,08E+05	9,05E+08	6,00E+11	3,82E+05
0,225	4,01E+04	2,88E+05	8,44E+08	5,62E+11	3,58E+05
0,235	3,75E+04	2,70E+05	7,86E+08	5,26E+11	3,35E+05
0,245	3,51E+04	2,53E+05	7,32E+08	4,92E+11	3,14E+05
0,255	3,28E+04	2,36E+05	6,81E+08	4,61E+11	2,93E+05
0,265	3,07E+04	2,21E+05	6,33E+08	4,32E+11	2,74E+05
0,275	2,86E+04	2,06E+05	5,88E+08	4,04E+11	2,56E+05
0,285	2,67E+04	1,92E+05	5,46E+08	3,79E+11	2,39E+05
0,295	2,49E+04	1,79E+05	5,07E+08	3,55E+11	2,22E+05
0,305	2,32E+04	1,66E+05	4,70E+08	3,33E+11	2,07E+05

FAT -luokat

3_1						
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1		DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)		FAT(ai)
0,025	3,2	5,9	36,9	28,0	7,1	7,1
0,035	3,1	5,7	35,3	26,9	6,7	6,7
0,045	2,9	5,4	33,8	25,8	6,4	6,4
0,055	2,8	5,2	32,4	24,7	6,2	6,2
0,065	2,7	5,0	31,1	23,6	5,9	5,9
0,075	2,6	4,7	29,8	22,5	5,6	5,6
0,085	2,5	4,5	28,5	21,5	5,4	5,4
0,095	2,3	4,3	27,3	20,5	5,1	5,1
0,105	2,2	4,1	26,1	19,5	4,9	4,9
0,115	2,1	3,9	24,9	18,6	4,7	4,7
0,125	2,0	3,8	23,8	17,6	4,5	4,5
0,135	1,9	3,6	22,7	16,7	4,2	4,2
0,145	1,8	3,4	21,6	15,8	4,0	4,0
0,155	1,8	3,2	20,6	15,0	3,8	3,8
0,165	1,7	3,1	19,5	14,1	3,6	3,6
0,175	1,6	2,9	18,5	13,3	3,4	3,4
0,185	1,5	2,8	17,6	12,5	3,3	3,3
0,195	1,4	2,6	16,6	11,8	3,1	3,1
0,205	1,3	2,5	15,7	11,0	2,9	2,9
0,215	1,3	2,3	14,8	10,3	2,7	2,7
0,225	1,2	2,2	13,9	9,6	2,6	2,6
0,235	1,1	2,0	13,1	9,0	2,4	2,4
0,245	1,0	1,9	12,2	8,3	2,3	2,3
0,255	1,0	1,8	11,4	7,7	2,1	2,1
0,265	0,9	1,7	10,7	7,1	2,0	2,0
0,275	0,8	1,5	9,9	6,5	1,8	1,8
0,285	0,8	1,4	9,2	6,0	1,7	1,7
0,295	0,7	1,3	8,5	5,4	1,6	1,6
0,305	0,7	1,2	7,8	4,9	1,4	1,4

FAT-luokat

3_2					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	2,1	4,0	37,0	28,0	4,5
0,035	2,0	3,8	35,3	26,9	4,3
0,045	1,9	3,7	33,9	25,8	4,1
0,055	1,9	3,5	32,5	24,7	3,9
0,065	1,8	3,4	31,1	23,6	3,8
0,075	1,7	3,2	29,8	22,5	3,6
0,085	1,6	3,1	28,6	21,5	3,4
0,095	1,6	2,9	27,4	20,5	3,3
0,105	1,5	2,8	26,2	19,5	3,1
0,115	1,4	2,7	25,0	18,6	3,0
0,125	1,4	2,6	23,9	17,6	2,9
0,135	1,3	2,4	22,7	16,7	2,7
0,145	1,2	2,3	21,7	15,8	2,6
0,155	1,2	2,2	20,6	15,0	2,5
0,165	1,1	2,1	19,6	14,1	2,3
0,175	1,0	2,0	18,6	13,3	2,2
0,185	1,0	1,9	17,6	12,5	2,1
0,195	0,9	1,8	16,6	11,8	2,0
0,205	0,9	1,7	15,7	11,0	1,9
0,215	0,8	1,6	14,8	10,3	1,8
0,225	0,8	1,5	14,0	9,6	1,7
0,235	0,7	1,4	13,1	9,0	1,6
0,245	0,7	1,3	12,3	8,3	1,5
0,255	0,6	1,2	11,5	7,7	1,4
0,265	0,6	1,1	10,7	7,1	1,3
0,275	0,6	1,1	9,9	6,5	1,2
0,285	0,5	1,0	9,2	6,0	1,1
0,295	0,5	0,9	8,5	5,4	1,0
0,305	0,4	0,8	7,8	4,9	0,9

FAT-luokat

3_3					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	1,3	2,4	37,0	28,0	4,5
0,035	1,2	2,3	35,3	26,9	4,3
0,045	1,1	2,2	33,9	25,8	4,1
0,055	1,1	2,1	32,5	24,7	3,9
0,065	1,1	2,0	31,2	23,6	3,8
0,075	1,0	2,0	29,9	22,5	3,6
0,085	1,0	1,9	28,6	21,5	3,4
0,095	0,9	1,8	27,4	20,5	3,3
0,105	0,9	1,7	26,2	19,5	3,1
0,115	0,8	1,6	25,0	18,6	3,0
0,125	0,8	1,6	23,9	17,6	2,9
0,135	0,8	1,5	22,8	16,7	2,7
0,145	0,7	1,4	21,7	15,8	2,6
0,155	0,7	1,3	20,6	15,0	2,5
0,165	0,7	1,3	19,6	14,1	2,3
0,175	0,6	1,2	18,6	13,3	2,2
0,185	0,6	1,1	17,6	12,5	2,1
0,195	0,6	1,1	16,7	11,8	2,0
0,205	0,5	1,0	15,7	11,0	1,9
0,215	0,5	1,0	14,8	10,3	1,8
0,225	0,5	0,9	14,0	9,6	1,7
0,235	0,4	0,9	13,1	9,0	1,6
0,245	0,4	0,8	12,3	8,3	1,5
0,255	0,4	0,7	11,5	7,7	1,4
0,265	0,4	0,7	10,7	7,1	1,3
0,275	0,3	0,6	9,9	6,5	1,2
0,285	0,3	0,6	9,2	6,0	1,1
0,295	0,3	0,6	8,5	5,4	1,0
0,305	0,3	0,5	7,8	4,9	0,9

FAT-luokat

3_4					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	9,9	18,3	114,3	189,4	21,6
0,035	9,7	18,0	111,1	185,4	21,2
0,045	9,6	17,7	109,0	181,6	20,9
0,055	9,4	17,4	107,1	177,7	20,6
0,065	9,3	17,2	105,2	174,0	20,3
0,075	9,2	16,9	103,3	170,3	20,0
0,085	9,0	16,7	101,6	166,7	19,7
0,095	8,9	16,4	99,8	163,2	19,4
0,105	8,8	16,2	98,1	159,7	19,1
0,115	8,7	16,0	96,4	156,3	18,9
0,125	8,5	15,8	94,7	152,9	18,6
0,135	8,4	15,6	93,1	149,6	18,4
0,145	8,3	15,3	91,4	146,3	18,1
0,155	8,2	15,1	89,8	143,1	17,9
0,165	8,1	14,9	88,2	140,0	17,7
0,175	8,0	14,7	86,6	136,9	17,4
0,185	7,9	14,5	85,0	133,8	17,2
0,195	7,8	14,3	83,5	130,9	17,0
0,205	7,7	14,1	81,9	127,9	16,7
0,215	7,6	13,9	80,4	125,1	16,5
0,225	7,5	13,7	78,8	122,2	16,3
0,235	7,4	13,5	77,3	119,4	16,1
0,245	7,3	13,4	75,7	116,7	15,9
0,255	7,2	13,2	74,2	114,0	15,7
0,265	7,1	13,0	72,7	111,3	15,5
0,275	7,0	12,8	71,2	108,7	15,2
0,285	6,9	12,6	69,7	106,1	15,0
0,295	6,8	12,4	68,2	103,6	14,8
0,305	6,7	12,2	66,8	101,1	14,6

FAT-luokat

3_5					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	6,6	12,5	113,9	188,5	14,0
0,035	6,4	12,2	110,6	182,1	13,7
0,045	6,3	12,0	108,5	178,0	13,4
0,055	6,2	11,8	106,5	174,2	13,2
0,065	6,1	11,6	104,6	170,5	13,0
0,075	6,1	11,4	102,7	166,9	12,8
0,085	6,0	11,3	100,9	163,4	12,6
0,095	5,9	11,1	99,2	159,9	12,5
0,105	5,8	10,9	97,4	156,5	12,3
0,115	5,7	10,8	95,7	153,1	12,1
0,125	5,6	10,6	94,0	149,8	11,9
0,135	5,5	10,5	92,4	146,6	11,8
0,145	5,5	10,3	90,7	143,4	11,6
0,155	5,4	10,2	89,1	140,3	11,4
0,165	5,3	10,0	87,5	137,2	11,3
0,175	5,2	9,9	85,9	134,1	11,1
0,185	5,1	9,7	84,3	131,2	10,9
0,195	5,1	9,6	82,7	128,2	10,8
0,205	5,0	9,4	81,1	125,4	10,6
0,215	4,9	9,3	79,6	122,5	10,4
0,225	4,8	9,1	78,0	119,7	10,3
0,235	4,8	9,0	76,5	117,0	10,1
0,245	4,7	8,8	74,9	114,3	10,0
0,255	4,6	8,7	73,4	111,6	9,8
0,265	4,5	8,6	71,9	109,0	9,7
0,275	4,5	8,4	70,4	106,5	9,5
0,285	4,4	8,3	68,9	103,9	9,4
0,295	4,3	8,1	67,4	101,5	9,2
0,305	4,3	8,0	65,9	99,0	9,1

FAT-luokat

3_6					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	3,9	7,5	113,7	187,7	8,1
0,035	3,8	7,4	110,4	183,8	7,9
0,045	3,7	7,2	108,2	180,0	7,7
0,055	3,7	7,1	106,2	176,2	7,6
0,065	3,6	7,0	104,3	172,5	7,5
0,075	3,6	6,9	102,4	168,9	7,4
0,085	3,5	6,8	100,6	165,3	7,3
0,095	3,4	6,7	98,8	161,8	7,1
0,105	3,4	6,6	97,1	158,4	7,0
0,115	3,3	6,5	95,4	155,0	6,9
0,125	3,3	6,4	93,7	151,7	6,8
0,135	3,2	6,3	92,0	148,4	6,7
0,145	3,2	6,2	90,3	145,2	6,6
0,155	3,1	6,1	88,7	142,1	6,5
0,165	3,1	6,0	87,1	139,0	6,4
0,175	3,0	5,9	85,5	135,9	6,3
0,185	3,0	5,8	83,9	132,9	6,2
0,195	2,9	5,7	82,3	130,0	6,1
0,205	2,9	5,6	80,7	127,1	6,0
0,215	2,8	5,5	79,1	124,2	5,9
0,225	2,8	5,4	77,6	121,4	5,8
0,235	2,7	5,3	76,0	118,6	5,7
0,245	2,7	5,2	74,5	115,9	5,6
0,255	2,6	5,1	72,9	113,3	5,5
0,265	2,6	5,0	71,4	110,6	5,4
0,275	2,5	4,9	69,9	108,1	5,3
0,285	2,5	4,8	68,4	105,5	5,2
0,295	2,5	4,7	66,9	103,0	5,1
0,305	2,4	4,6	65,4	100,6	5,0

FAT-luokat

3_7					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	10,7	19,7	120,2	1061,0	23,4
0,035	10,5	19,2	115,7	1036,0	22,9
0,045	10,3	18,9	113,0	1011,0	22,5
0,055	10,1	18,6	110,6	987,6	22,1
0,065	9,9	18,3	108,2	964,9	21,8
0,075	9,8	17,9	105,9	942,9	21,4
0,085	9,6	17,7	103,7	921,4	21,1
0,095	9,5	17,4	101,5	900,6	20,7
0,105	9,3	17,1	99,4	880,2	20,4
0,115	9,2	16,8	97,3	859,8	20,1
0,125	9,0	16,5	95,2	839,0	19,8
0,135	8,9	16,2	93,2	818,8	19,4
0,145	8,7	16,0	91,2	799,7	19,1
0,155	8,6	15,7	89,3	781,5	18,8
0,165	8,4	15,4	87,3	763,8	18,5
0,175	8,3	15,2	85,4	746,5	18,2
0,185	8,1	14,9	83,6	729,6	17,9
0,195	8,0	14,6	81,7	713,3	17,6
0,205	7,9	14,4	79,9	697,4	17,3
0,215	7,7	14,1	78,1	682,0	17,0
0,225	7,6	13,8	76,3	666,9	16,7
0,235	7,4	13,6	74,5	652,3	16,4
0,245	7,3	13,3	72,8	638,0	16,1
0,255	7,2	13,1	71,0	624,1	15,8
0,265	7,0	12,8	69,4	610,6	15,5
0,275	6,9	12,6	67,7	597,4	15,2
0,285	6,8	12,3	66,0	584,5	14,9
0,295	6,6	12,1	64,4	572,0	14,6
0,305	6,5	11,8	62,8	559,7	14,4

FAT-luokat

3_8					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	7,0	13,3	119,7	1049,0	14,9
0,035	6,8	12,9	115,1	1024,0	14,5
0,045	6,7	12,6	112,3	998,7	14,2
0,055	6,6	12,4	109,8	975,4	13,9
0,065	6,4	12,2	107,4	952,9	13,7
0,075	6,3	12,0	105,1	931,0	13,5
0,085	6,2	11,7	102,9	909,8	13,2
0,095	6,1	11,5	100,7	889,2	13,0
0,105	6,0	11,3	98,5	869,1	12,8
0,115	5,9	11,1	96,4	849,0	12,5
0,125	5,8	10,9	94,4	828,7	12,3
0,135	5,7	10,7	92,4	808,9	12,1
0,145	5,6	10,5	90,4	790,2	11,9
0,155	5,5	10,3	88,4	772,4	11,7
0,165	5,4	10,1	86,5	755,1	11,4
0,175	5,3	9,9	84,6	738,3	11,2
0,185	5,2	9,7	82,7	721,9	11,0
0,195	5,1	9,6	80,9	705,9	10,8
0,205	5,0	9,4	79,0	690,4	10,6
0,215	4,9	9,2	77,2	675,2	10,4
0,225	4,8	9,0	75,4	660,4	10,2
0,235	4,7	8,8	73,7	646,0	10,0
0,245	4,6	8,6	72,0	632,0	9,8
0,255	4,5	8,5	70,3	618,3	9,6
0,265	4,4	8,3	68,6	605,0	9,4
0,275	4,3	8,1	66,9	591,9	9,2
0,285	4,2	7,9	65,3	579,2	9,0
0,295	4,1	7,7	63,7	566,9	8,8
0,305	4,0	7,6	62,1	554,8	8,6

FAT-luokat

3_9					
	DOB = 0	DOB = - 1/2	DOB -1	DOB 1	DOB 1/2
ai	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)	FAT(ai)
0,025	4,1	8,0	119,4	1131,0	8,5
0,035	4,0	7,7	114,7	1060,0	8,3
0,045	3,9	7,5	111,9	1005,0	8,1
0,055	3,8	7,4	109,4	978,4	7,9
0,065	3,8	7,3	107,0	955,5	7,8
0,075	3,7	7,1	104,7	933,4	7,6
0,085	3,6	7,0	102,4	912,0	7,5
0,095	3,5	6,8	100,2	891,1	7,3
0,105	3,5	6,7	98,1	870,8	7,2
0,115	3,4	6,6	96,0	851,1	7,1
0,125	3,3	6,4	93,9	831,8	6,9
0,135	3,3	6,3	91,9	813,1	6,8
0,145	3,2	6,2	89,9	794,9	6,7
0,155	3,1	6,1	87,9	777,3	6,5
0,165	3,1	6,0	86,0	760,0	6,4
0,175	3,0	5,8	84,1	742,8	6,3
0,185	3,0	5,7	82,2	725,9	6,1
0,195	2,9	5,6	80,4	709,6	6,0
0,205	2,8	5,5	78,6	693,7	5,9
0,215	2,8	5,4	76,8	678,3	5,8
0,225	2,7	5,2	75,0	663,2	5,6
0,235	2,7	5,1	73,3	648,5	5,5
0,245	2,6	5,0	71,5	634,3	5,4
0,255	2,5	4,9	69,8	620,5	5,3
0,265	2,5	4,8	68,2	607,1	5,2
0,275	2,4	4,7	66,5	594,0	5,0
0,285	2,4	4,6	64,9	581,2	4,9
0,295	2,3	4,5	63,3	568,8	4,8
0,305	2,3	4,4	61,7	556,7	4,7

Puolisymmetrisen mallin yksityiskohtainen laskentakaava kestoi'ille ja FAT-luokille

Lappeenranta University of
Technology
Steel structures

data :=



...ja symmetrisen mallin...

points := rows(data)

points = 24

adata := data

Kdata := data

Särön
alkupituus:

a_{ii} := data_{0,0} a_{iii} := 0.025

Alustava
K1-arvo

K_{ii} := Kdata_{0,0} K_{ii} = 480.278

Särön loppupituus

a_{ff} := data_{points-1,0} a_{ff} = 2.425

Lopullinen
K1-arvo

K_{ff} := Kdata_{points-1,0} K_{ff} = 2.727 × 10³

Särön kasvuaskeleet

	0
0	0.025
1	0.038
2	0.05
3	0.075
4	0.1
5	0.125
6	0.15
adata = 7	0.175
8	0.225
9	0.275
10	0.325
11	0.375
12	0.425
13	0.525
14	0.625
15	...

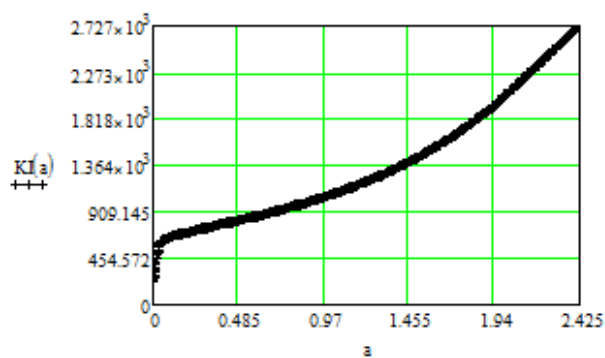
K1-arvo
t

	0
0	480.278
1	606.8
2	627.986
3	651.665
4	668.269
5	682.16
6	694.411
Kdata = 7	705.804
8	725.725
9	746.475
10	766.479
11	785.683
12	805.113
13	844.873
14	885.903
15	...

Puolisymmetrisen mallin yksityiskohtainen laskentakaava kestoille ja FAT-luokille

Kuvaajaa K1-arvoista särön kasvaessa

$$K1(a) := \text{linterp}(adata, Kdata, a)$$



$$C := 3.0 \cdot 10^{-13} \quad m := 3 \quad da := 0.01 \quad ai := a_{ii}, a_{ii} + da \dots a_{if}$$

Parisin
yhtälö:

$$N1(ai) := \int_{ai}^{a_{if}} \frac{1}{K1(a)^m - C} da \quad N1(a_{ii}) = 7.613 \times 10^3$$

Kestoikä jokaiselle särön pituudelle

$N1(ai)$	ai
$7.613 \cdot 10^3$	0.025
$7.383 \cdot 10^3$	0.035
$7.238 \cdot 10^3$	0.045
$7.102 \cdot 10^3$	0.055
$6.974 \cdot 10^3$	0.065
$6.851 \cdot 10^3$	0.075
$6.732 \cdot 10^3$	0.085
$6.617 \cdot 10^3$	0.095
$6.505 \cdot 10^3$	0.105
$6.396 \cdot 10^3$	0.115
$6.29 \cdot 10^3$	0.125
$6.186 \cdot 10^3$	0.135
$6.085 \cdot 10^3$	0.145
$5.985 \cdot 10^3$	0.155
$5.887 \cdot 10^3$	0.165
...	...

Puolisymmetrisen mallin yksityiskohtainen laskentakaava kestoille ja FAT-luokille

Väsymiskestävyyden FAT-luokka

$\sigma := 190$ rakenteellinen
iännitys

$$FAT(a_i) := \sigma \sqrt[3]{\frac{NI(a_i)}{2 \cdot 10^6}}$$

FAT-luokka jokaiselle särön pituudelle

FAT(a _i) =	a _i =
29.667	0.025
29.364	0.035
29.171	0.045
28.988	0.055
28.812	0.065
28.641	0.075
28.475	0.085
28.312	0.095
28.152	0.105
27.993	0.115
27.838	0.125
27.683	0.135
27.531	0.145
27.38	0.155
27.23	0.165
...	...

[1] Niu X. and Glinka G., Stress-intensity factors for semi-elliptical surface cracks in welded joints, International Journal of Fracture, 40, pp. 225-270, 1989