LUT-YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

RHS-PUTKEEN HITSATUN PALSTALEVYN PÄÄDYN TARKOITUKSENMUKAINEN MUOTOILU

CONVENIENT DESIGN OF TIPS OF WELDED COVER PLATE IN RHS TUBES

Lappeenrannassa 18.10.2019

Mikael Paavolainen

Ohjaaja DI Antti Ahola

Tarkastaja DI Antti Ahola

SAMMANFATTNING

LUT-yliopisto

LUT Energiajärjestelmät

LUT Kone

Mikael Paavolainen

Formateringen för ändan av en spaltskiva svetsad till en konstruktionsrör

Kandidatarbete

2019

29 sidor, 23 bilder, 5 tabeller och 3 tillägg

Granskare: DI Antti Ahola

Instruktör: DI Antti Ahola

Nyckelord: Hot Spot, ENS, FE-analys, spaltskiva, utmattningshållfasthet, svetsad fog

Kandidatarbetets uppgift är att ta reda på hur man borde formatera ändorna på en spaltskiva som svetsas i en 150x150x8 storleks konstruktionsrör. Två olika fall analyserades med hjälp av FE-analys. I ett fall är spetsarna i konstruktionsrörets sidor och i andra fallet är spetsen på hörnet. Två olika forskningsmetoder används i denna forskning. De två använda metoderna är Hot Spot- och ENS-metoden. Fyra olika modeller gjordes, därför att man gjorde två olika modeller av båda fallen.

I litteraturgranskningen presenterar man metoderna som har använts och också ekvationerna med vilka man fick resultaten. Litteraturgranskningen är bara en liten del av arbetet och största vikten är vid FE-analysen och i modelleringen. FE-analysen gjordes med Abaqus CAE-programmet, därför det var effektivt att ta submodeller med den.

Resultaten visade att det lönar sig att lägga spetsarna i sidorna. Det var slutligen en ganska stor skillnad i resultaten. Skillnaden i spänningarna var som störst nästan två gånger större i situationen där spetsen var på hörnet jämfört med situationen där spetsarna var i sidorna.

ABSTRACT

LUT University

LUT School of Energy Systems

LUT Mechanical Engineering

Mikael Paavolainen

Convenient design of tips of welded cover plate in RHS tubes

Bachelor's thesis

2019

29 pages, 23 pictures, 5 tables and 3 appendices

Examiner: M. Sc. (Tech.) Antti Ahola

Supervisor: M. Sc. (Tech.) Antti Ahola

Keywords: Hot Spot, ENS, FE-analysis, cover plate, fatigue strength, welded joint

The objective of this bachelor's thesis was to investigate how the end of a cover plate should be designed from fatigue strength point-of-view. The cover plate is welded on a 150x150x8 rectangular hollow section (RHS) tube. Two design concepts were analyzed. In the first design case, the tips were located on the RHS faces and in the second design case, the tip was on the corner. Two different fatigue strength assessment methods were used, and they were the effective notch stress concept and the structural Hot Spot stress method. Four different models were modeled because two models of both design cases were needed.

The literature review is focused on the used methods and explaining the equations used for the calculations. The literature review is only a small part of the thesis and the bigger focus is on the modelling part and the FE-analysis. The FE-analysis was made using Abaqus CAE because it is efficient to take submodels with it.

The results showed that it is more convenient to place the tips on the RHS faces. The difference in the stress was quite significant. The stress was two times higher when the tip was on the corner compared to the case with the tips on the RHS faces.

SISÄLLYSLUETTELO

SAMMANFATTNING

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1. JOHDANTO 6

1.1 Työn tavoitteet ja tausta 6

1.2 Tutkimuskysymykset ja rajaukset 7

2. KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT 8

2.1 Hot Spot-menetelmä 8

2.2 ENS-menetelmä 10

2.3 Väsymiskestävyyden laskeminen 11

3. MALLINNUS 13

3.1 Analysoitavat geometriat 13

3.2 FE-mallit 16

4. TULOKSET 23

4.1 Hot Spot-tulokset 23

4.2 ENS-tulokset 25

5. TULOSTEN TARKASTELU 27

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 28

LÄHTEET 29

LIITTEET

LIITE I: FAT-luokat

LIITE II: Mathcad laskentapohja, kärjet kyljissä

LIITE III: Mathcad laskentapohja, kärki kulman päällä

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

E	Youngin moduuli, kimmokerroin [GPa]
m	SN-käyrän kulmakerroin [-]
N_D	laskennallinen kuormituskertojen määrä
r	rajaviivapyöristys [mm]
t	levynpaksuus [mm]
v	Poissonin vakio [-]
σ	kuorma [MPa]
$\Delta\sigma_D$	jännitysvaihteluiden suunnitteluarvo [MPa]
σ_b	taivutusjännitys [MPa]
σ_{hs}	rakenteellinen jännitys [MPa]
σ_m	kalvojännitys [MPa]
σ_{nom}	nimellinen jännitys [MPa]
σ_{nl}	epälineaarinen jännityshuippu [MPa]
$\sigma(x)$	jännitysjakauma levyn paksuuden yli [MPa]

ENS	Effective Notch Stress
FAT	Fatigue class (väsymislujuusluokka)
FE	Finite Element
HS	Hot Spot
IIW	International Institute of Welding
RHS	suorakaideprofiili

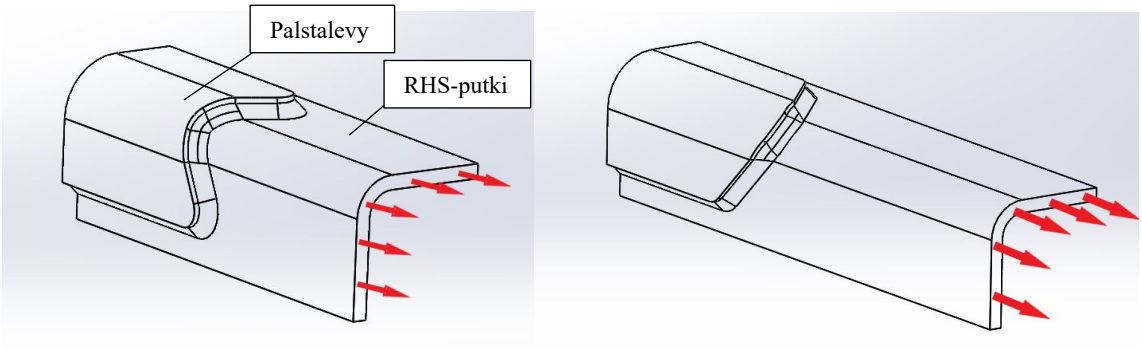
1. JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan RHS-putkeen hitsattavan palsalevyn päädyn tarkoituksenmukaista muotoilua. Palstalevy on hitsattu RHS-putkeen pienahitsillä. Hitsausliitoksen väsymiskestävyyttä voidaan tutkia käyttämällä esimerkiksi ENS-menetelmää (tehollisen lovijännityksen menetelmä) tai HS-menetelmää (Hot Spot menetelmä). Nämä menetelmät on esitetty luvussa 2. Erilaisiin tutkimusmenetelmiin ei voida käyttää samaa mallia, joten voidaan joutua tekemään menetelmäkohtainen FE-malli (Finite Element) samalle rakenteelle. Tässä työssä tehdään yhteensä neljä erilaista FE-mallia, koska palstalevyjä on yhteensä kaksi kappaletta ja molemmista tehdään HS-malli ja ENS-malli. ENS-malli on hiukan monimutkaisempi geometrialtaan, verrattuna HS-malliin, sillä hitsin rajaviivalle mallinnetaan 1mm fiktiivinen pyöristys. Geometriamallit tehdään SolidWorks:llä johtuen geometrian monimutkaisuudesta.

Hitsatun rakenteen väsymiskestävyyteen vaikuttavat monet erilaiset asiat. Valmistuksen aikana voi muodostua alkusärö ja käytön aikana särö kasvaa ja lopulta koko rakenne murtuu. Särö voi myös syntyä käytön aikana mikä johtuu pienten alkusäröjen ydintymisestä. Jännitysvaihtelut aiheuttavat sen, että särö kasvaa. Jännitysvaihtelut taas johtuvat siitä, että kuorman suuruus, paikka ja suunta vaihtelevat. Särön alku on yleensä hitsin rajaviivalla tai se voi myös olla juuren puolella. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 229–230.)

1.1 Työn tavoitteet ja tausta

Työ tehdään LUT-yliopistolle. Työssä tutkitaan millä tavalla eri tavalla muotoillun palstalevyn pääty vaikuttaa väsymiskestävyyteen. Palsalevyjä on kaksi erilaista, toisessa pyöristys on RHS-putken kylkien päällä ja toisessa kulman päällä. Alla kuvassa 1 on esitetty molemmat palsalevytyypit.



a) b)

Kuva 1. Palstalevyn kärjet kyljissä (a), kärki kulman päällä (b).

Palstalevyjen kärkien pyöristykset on määritetty yhtä suuriksi. Eli tapauksessa (a) palstalevyn pyöristykset kyljissä ovat samat kuin tapauksen (b) pyöristys kulman päällä. Oletettavasti jännityskeskittymä on pyöristyksen kärjen kohdalla.

1.2 Tutkimuskysymykset ja rajaukset

FE-analyysien avulla etsitään kysymyksiä seuraaviin kysymyksiin:

- Mihin maksimijännitys tulee molemmissa tapauksissa?
- Kummalla tavalla palstalevyn päädyn muotoilu kannattaa tehdä?
- Kuinka suuri vaikutus eri päätyjen muotoilulla on väsymiskestävyyteen?

Kaikki analyysit suoritetaan lineaarisesti eli geometrisesti tai materiaalisesti epälineaarista käyttäytymistä ei oteta huomioon. Myös palstalevyjen päädyn muotoilut on rajoitettu kahteen erilaiseen geometriaan, jotka ovat esitetty luvussa 1.1. Tässä työssä tutkitaan vain 150x150x8 mitoilla olevaa RHS-putkea. Samoin palstalevyssä käytetään vain yhtä paksuutta eli 10 mm. Tässä työssä voidaan hyödyntää rakenteita mallinnettaessa symmetriaa, joten riittää, että vain ¼ malleista tehdään. Tällä tavalla saadaan mallinnus tehtyä tehokkaasti ja elementtimäärä laskee myös huomattavasti, mikä taas lyhentää laskenta-aikoja.

2. KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä työssä väsymiskestävyyttä tutkitaan ENS- ja HS-menetelmillä. Niiden avulla lasketaan väsymiskestoikä liitokselle ja määritetään kumpi palstalevyn muotoilu, on järkevämpi väsymiskestoiän kannalta. Luvuissa 2.1 ja 2.2 esitetään nämä eri menetelmät tarkemmin. Nimellisen jännityksen menetelmää ei käytetä tässä työssä, koska rakenteet ovat monimutkaisia ja sillä ei pystytä ottamaan huomioon rakenteellisia epäjatkuvuuksia. Taulukossa yksi on esitetty eri epäjatkuvuudet ja mikä menetelmä ottaa mitkäkin tekijät huomioon. (Niemi, E. & Kemppi, J. 1993, s. 232-234.)

Taulukko 1. Yhteenveto epäjatkuvuuksista, jotka otetaan huomioon käyttäen nimelliset jännitykset, ENS ja HS-menetelmiä. (Niemi 2003, s. 95)

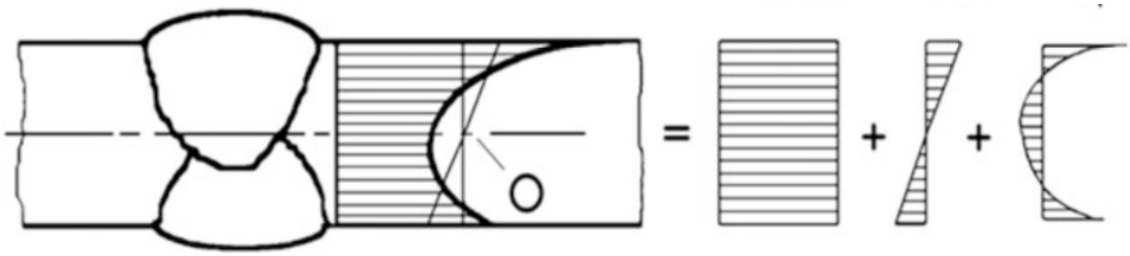
Jännitys-suure	Makrogeometria	Muotovirhe	Rakenteellinen epäjatkuvuus	Paikallinen lovi	Alkusärön koko
σ_{nom}	x	*			
σ_{HS}	x	x	x		
σ_{ENS}	x	x	x	x	

* Vain tyypillistä muotovirhettä suuremman virheen lisävaikutus otetaan tarvittaessa huomioon

2.1 Hot Spot-menetelmä

Kyseessä on rakenteellinen jännitys ja se esiintyy levymäisissä rakenteissa. Se koostuu kalvo- ja taivutusjännityksestä. (Niemi, E. & Kemppi, J. 1993, s. 234.) Hot Spot -menetelmä on alun perin syntynyt, kun tutkittiin pyöreiden rakenneputkien liitoksia offshore-rakenteissa. Kuvassa 2 on esitetty eri jännityskomponentit lovijännityksessä. (Niemi, E. & Kemppi, J. 1993, s. 251.)

Lovijännitys $\sigma_{ns} = \sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}$



Kuva 2. Hitsatun liitoksen jännityskomponentit. Yhtälössä σ_{ns} on lovijännitys, σ_m kalvojännitys, σ_b taivutusjännitys ja σ_{nlp} lovijännityksen epälineaarinen osuus. (mukaillen: Hobbacher 2014, s. 14.)

Hot Spot -menetelmä sopii käytettäväksi paremmin kuin nimellisen jännityksen menetelmä, jos nimellistä jännitystä ei saada määritettyä rakenteesta monimutkaisen geometrian vuoksi. Tässä tapauksessa FE-analyysit suoritetaan, joten rakenteelliset jännitykset ja väsymislujuus pystytään määrittämään käyttäen Hot Spot-menetelmää. Jos hitsiliitoksen kulmavirhe on suurempi kuin nimellisen jännityksen menetelmän mukaiset sallitut rajat, käytetään myös Hot Spot-menetelmää. (Jonsson et al., 2016 s. 15)

Rakenteellinen jännitys voidaan määrittää laskemalla jännityskomponentit erikseen, eli määrittämällä kalvojännitys, taivutusjännitys ja epälineaarinen osuus ja sitten laskemalla yhteen kalvojännitys ja taivutusjännitys. Jännityksen epälineaarista osuutta ei oteta laskennassa huomioon, kun lasketaan rakenteellinen jännitys.

Jännitysjakauma voidaan määrittää FE-analyysin avulla. Käyttäen jännitysjakaumaa saadaan laskettua kalvojännitys σ_m seuraavasti (Hobbacher 2014, s. 15.):

$$\sigma_m = \frac{1}{t}\int_{x=0}^{x=t} \sigma(x)\, dx \qquad (1)$$

Yhtälössä 1 $\sigma(x)$ on jännitysjakauma levyn paksuuden yli ja t on levyn paksuus. Taivutusjännityksen osuus saadaan laskettua seuraavasti (Hobbacher 2014, s. 15.):

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

Yhtälössä 2 σ_m on kalvojännitys, joka saadaan yhtälöstä 1. Kun jännityskomponentit on laskettu, saadaan rakenteellinen jännitys laskettua seuraavasti (Ruukki 2010 s. 429):

$$\sigma_{hs} = \sigma_m + \sigma_b \quad (3)$$

Lovijännityksen epälineaarinen osuus σ_{nl} saadaan laskettua myös seuraavasti (Hobbacher 2014, s. 15.):

$$\sigma_{nl}(x) = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right)\sigma_b \quad (4)$$

Yhtälössä 4 σ_m on kalvojännitys mikä saadaan yhtälöstä 1 ja σ_b on taivutusjännitys, joka saadaan yhtälöstä 2. Vaikka epälineaarista osuutta ei tarvita, kun lasketaan rakenteellinen jännitys, on silti hyvä tunnistaa se. Rakenteellisia jännityksiä laskiessa käytetään normaalijännityksiä.

2.2 ENS-menetelmä

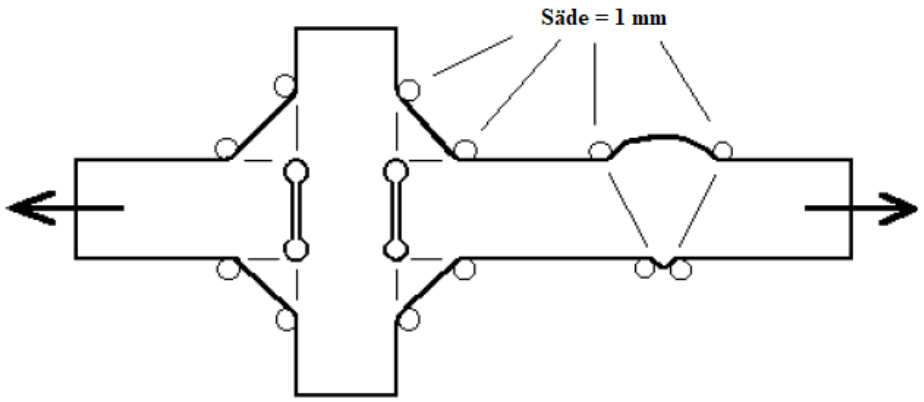
Tehollisen lovijännityksen menetelmässä oletetaan, että materiaali käyttäytyy lineaarielastisesti. ENS-menetelmää käytettäessä voidaan ottaa huomioon myös hitsin juuren väsyminen, mitä taas Hot Spot-menetelmässä ei pystytä tarkastelemaan.Hitsin rajaviivalle mallinnetaan fiktiivinen pyöristyssäde, sillä menetelmässä määritetään loven pohjan väsymiseen vaikuttava tehollinen jännitysvaihtelu. Tässä työssä ei tehdä pyöristystä hitsin juureen. IIW:n suositusten mukaan pyöristyssäde r = 1 mm on antanut luotettavia tuloksia. Tämä tapa on kuitenkin rajattu t>5 mm levyn paksuuksille, joten tähän tutkimukseen se sopii mainiosti. (Hobbacher 2014, s. 29.)

ENS-mallista saadaan FE-analyysistä suoraan hitsin juuren ja rajaviivan jännityskonsentraatiokertoimet. Siten voidaan helposti verrata eri geometrioiden väsymiskestävyyttä. IIW:llä on myös annettu suositukset hitsin rajaviivalla elementtikoille, jotka on esitetty alla taulukossa 2.(Hobbacher 2014, s. 29.)

Taulukko 2. IIW:n suositukset elementtikoolle (mukaillen: Hobbacher 2014, s. 31).

Elementtityyppi	Suhteellinen koko	Absoluuttinen koko [mm]	Elementtien lukumäärä 45° asteen kaaressa	Elementtien lukumäärä 360° asteen kaaressa
Parabolinen, välisolmuilla	≤ r/4	≤ 0,25	≥ 3	≥ 24
Lineaarinen	≤ r/6	≤ 0,15	≥ 5	≥ 40

Tässä työssä on käytetty vielä tiheämpää elementtiverkkoa hitsin rajaviivalla, jotta saadaan minimoitua virheiden mahdollisuus ja tuloksista saadaan tarkempia. Lineaarisia elementtejä käyttäessä on suositeltu, että käytetään viittä tai useampaa elementtiä hitsin rajaviivalla. Alla kuvassa 3 on esitetty fiktiivisten pyöristyksien suositellut kohdat.



Kuva 3. Fiktiivisten pyöristyksien suositellut kohdat. (mukaillen: Hobbacher 2014, s. 30.)

2.3 Väsymiskestävyyden laskeminen

Kun jännitysarvot on saatu FE-malleista, voidaan laskea arvio väsymiskestävyydestä. Väsymiskestävyys tarkoittaa kuinka monta sykliä jännitysvaihteluita rakenne kestää. Se voidaan laskea seuraavasti (Hobbacher 2014, s. 111.):

$$N_D = \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_D}\right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (5)$$

Yhtälössä 5 N_D on laskennallinen kuormituskertojen määrä, FAT väsymiskestävyysluokka, $\Delta\sigma_D$ jännitysvaihteluiden suunnitteluarvo ja m SN-käyrän kulmakerroin.

Kulmakerroin *m* on IIW:n mukaan pienille syklimäärille 3,0 aina $N = 10^7$ asti ja suurille syklimäärille 5,0 aina $N = 10^8$ asti. Yhtälöön 3 valitaan siis sopiva *m* kerroin ja *FAT*- luokka tilanteeseen nähden ja saadaan laskettua laskennallinen väsymiskestoikä. (Hobbacher 2014, s. 41.) *FAT*-luokka määräytyy rakenteellista jännitystä käyttäen liitoksen geometrian mukaan ja tässä tapauksessa se on 100 MPa. Liitteessä I on esitetty taulukko, jonka perusteella *FAT*-luokka saadaan. (Hobbacher, 2014, s. 76) Tehollista lovijännitystä käyttäessä *FAT*-luokka on joko 200 MPa tai 225 MPa, määräytyen siitä käytetäänkö maksimipääjännitystä vai von Misesin vertailujännitystä. Alla taulukossa on 3 on esitetty eri FAT-luokat. (Sonsino 2009, s. 4.)

Taulukko 3. FAT-arvot kun käytetään tehollisen lovijännityksen menetelmää. (mukaillen: Sonsino 2009, s. 4.)

Pyöristyssäde r [mm]	1,00	1,00
Hypoteesi	Maksimipääjännitys	von Mises
Teräs	225	200

3. MALLINNUS

Rakenteen monimutkaisuuden vuoksi on helpompi käyttää SolidWorks-ohjelmaa geometriamallien tekemiseen. Näin saadaan helpommin luotua haluttu geometria, koska se tarjoaa loistavat työkalut mallintamista varten. SolidWorks malli on sen jälkeen helppo tuoda FE-ohjelmistoon. Skaalauksia ei tarvitse tehdä, koska mitat siirtyvät suoraan oikein, kun malli tuodaan ohjelmasta toiseen. RHS-putki on kokoa 150x150x8. Putkesta mallinnetaan vain ¼ osa, koska symmetriaa voidaan hyödyntää. Symmetriaa hyödyntämällä saadaan elementtimäärää laskettua, mikä vähentää huomattavasti myös analyysin laskenta-aikoja. Samoin tehdään palstalevystä vain puolet ja siinäkin hyödynnetään symmetriaa. FE-analyysi tehdään käyttäen Abaqus CAE-ohjelmaa. Abaqus valittiin, koska se mahdollistaa alimallinnustekniikan tehokkaasti monimutkaisille geometrioille. Alimallilla saadaan tutkittua tarkemmin tiettyä kohtaa rakenteesta ja elementtiverkko saadaan todella tiheäksi kriittisimmässä kohdassa.

Malleja tehdään yhteensä neljä kappaletta. SolidWorks-malleihin tuli suurempia muutoksia vain, jos palstalevyn tyyppi vaihtui. ENS- ja Hot Spot-mallit erosivat vain siltä osin, että toiseen tulee hitsin rajaviivalle pyöristys ja toiseen ei.

3.1 Analysoitavat geometriat

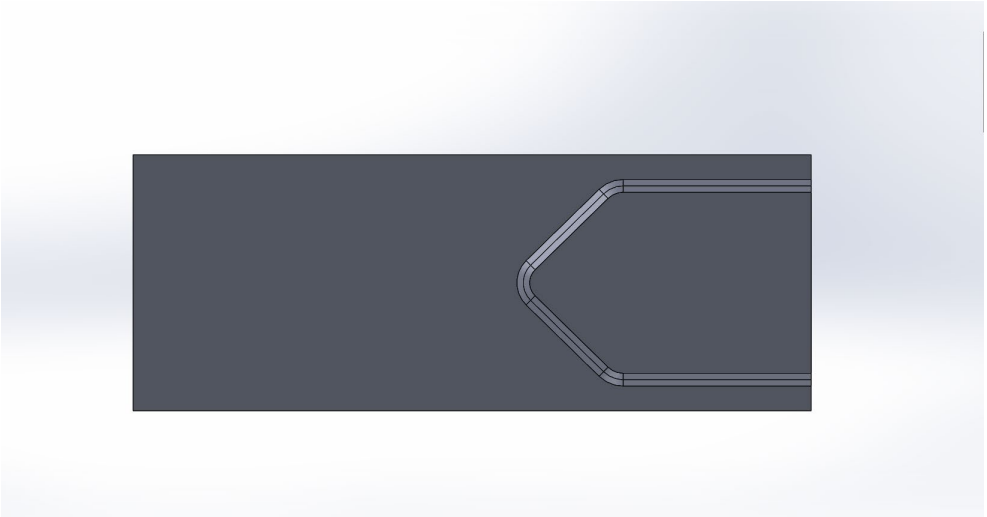
Kaikki mallit tehdään yhtenä osana, eli rakennetta ei mallinneta kokoopanona. Rakenne oli helpointa tehdä kolmessa osassa:

- RHS-putken mallinnus levynä
- Palstalevyn mallinnus RHS-putken päälle
- Hitsin mallinnus

Palstalevyn ja RHS-putken väliin jätetään 0,1 mm ilmarako. Palstalevy on kiinni RHS-putkessa vain hitsin kautta. Ensimmäinen palstalevytyyppi on esitetty auki levitettynä alla kuvassa 3.

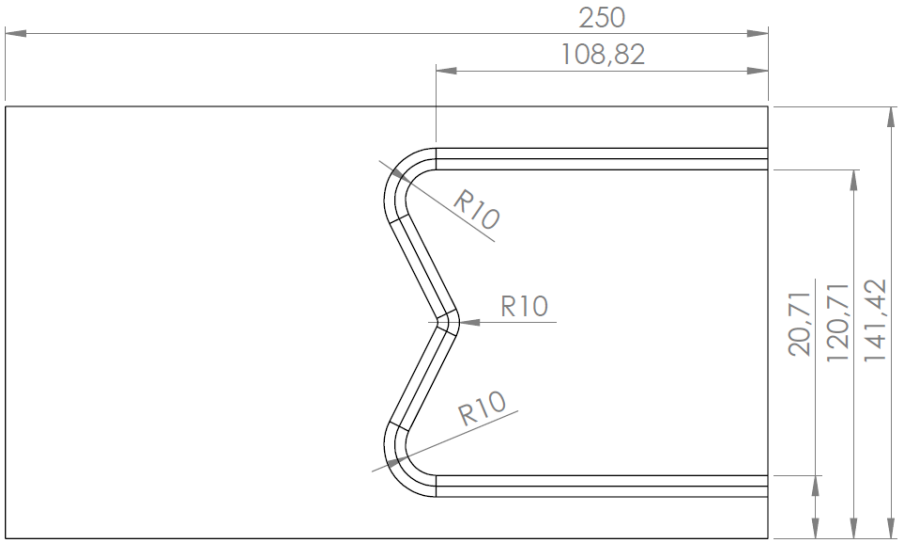
Kuva 4. 1/2 Palstalevy, jossa kärjet kyljissä ja 1/4 RHS-putki.

Toisessa palstalevytyypissä pyöristys on laitettu RHS-putken kulman päälle. Kun pyöristys laitetaan kulman päälle, tulee geometria todella monimutkaiseksi. Monimutkaisen siitä tekee, koska RHS-putken kulma on pyöreä ja siihen pitäisi saada kolmionmuotoinen hitsi mallinnettua. Tämän takia rakenne tehtiin ensimmäiseksi auki levitettynä ja vasta lopuksi se taivutettiin oikeaan muotoon. Toinen palstalevytyyppi on esitetty auki levitettynä alla kuvassa 4.

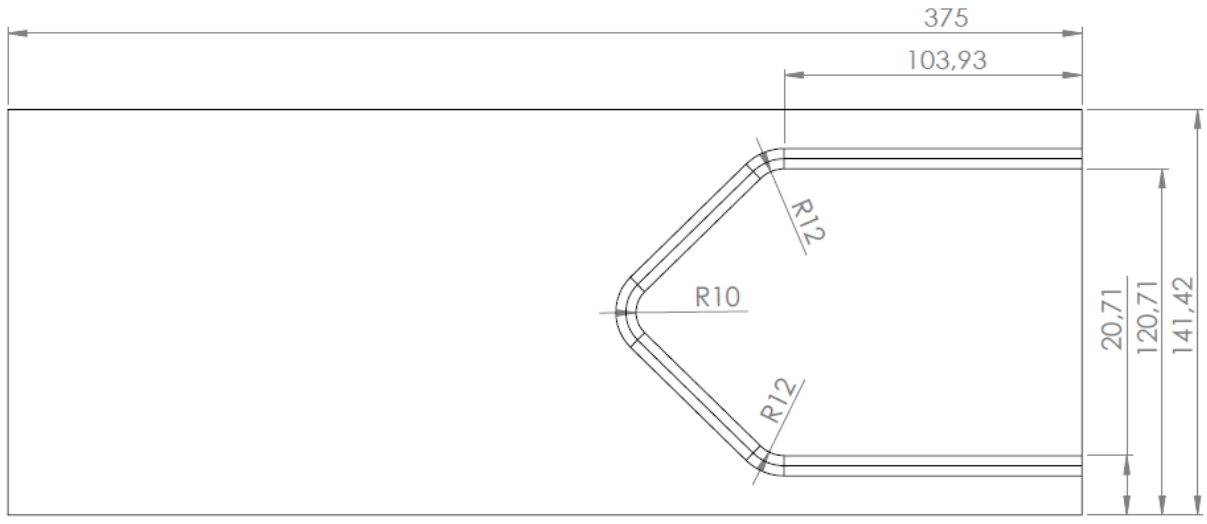


Kuva 5. 1/2 Palstalevy, jossa kärki kulman päällä ja 1/4 RHS-putki.

Palsalevyihin laitettiin molempiin samat pyöristykset ja pienahitsin a-mitta pidettiin myös samana. Näin tuloksia on helpompi verrata keskenään. Palstalevyjen mitat on esitetty alla kuvassa 5 ja 6.

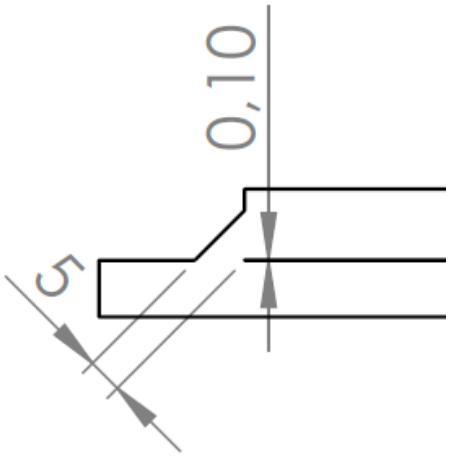


Kuva 6. 1/4 RHS-putki ja 1/2 palsalevy hitsin kanssa, jossa kärjet kyljissä, mitat millimetreinä.



Kuva 7. 1/4 RHS-putki ja 1/2 palsalevy hitsin kanssa, jossa kärki kulman päällä, mitat millimetreinä.

Ilmarako mikä on palsalevyn ja RHS-putken välissä ja hitsin a-mitta on esitetty alla kuvassa 7.



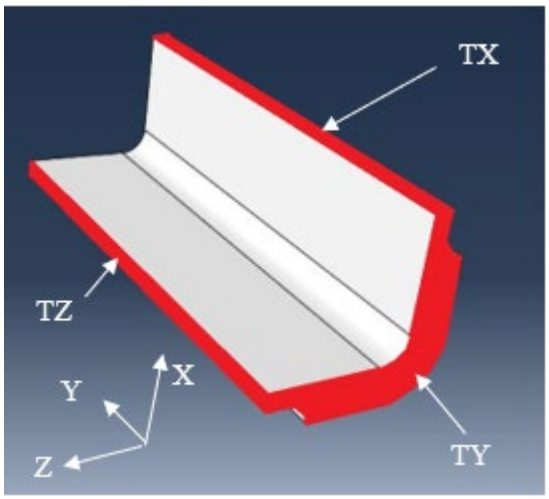
Kuva 8. Hitsin a-mitta ja ilmarako palstalevyn ja RHS-putken välissä, mitat millimetreinä.

Koko mallin saa sen jälkeen taitettua käyttäen ”Flex” työkalua. Siinä voidaan säätää mistä kohtaa levy taitetaan ja siten saadaan haluttu taitos. Molemmat taittotasot ovat sijoitettu 55 mm päähän levyn reunoista.

3.2 FE-mallit

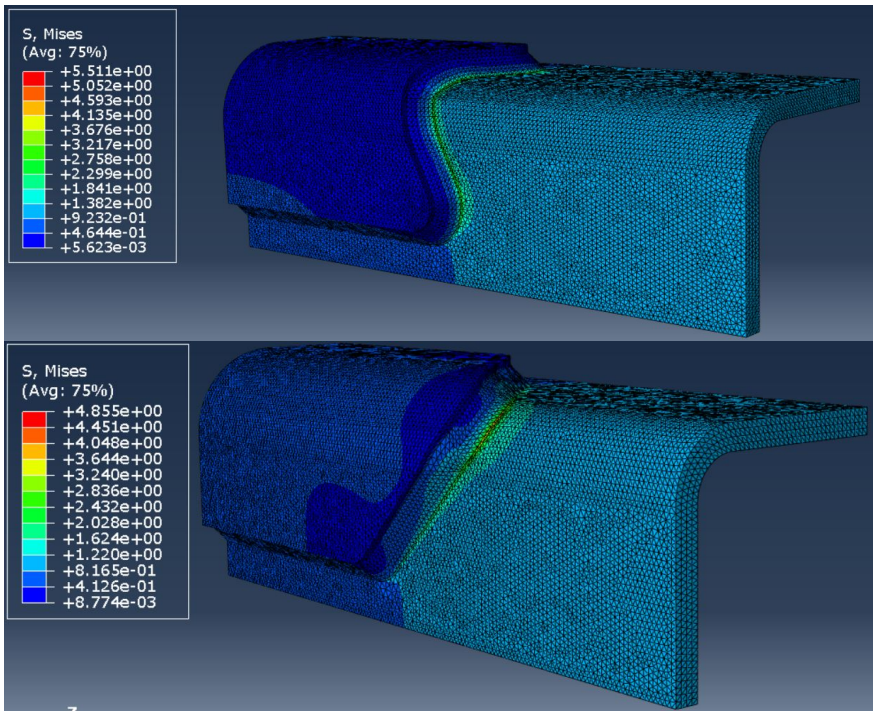
FE-ohjelmaksi valikoitui Abaqus CAE, koska sillä saadaan alimalleja analysoitua tehokkaasti. Geometrian tuonti onnistuu helposti SolidWorks-ohjelmasta, kun mallin tallentaa STEP-tiedostomuodossa, jolloin skaalausta ei tarvitse tehdä. Materiaalivakiot mitä käytetään ovat kimmokerroin E = 210 GPa ja Poissonin vakio v = 0,3. Kuormana kaikissa tapauksissa käytetään σ = 1 MPa. Tällöin saadaan ENS-mallista suoraan luettua jännityskonsentraatiokertoimet.

Kuorma on asetettu rakenteen päähän kuvan 1 mukaisesti. Rakenteen toinen pää on jäykästi tuettu, eli kaikki siirtymät on estetty. Tässä työssä hyödynnettiin symmetriaa ja alla kuvan 9 merkityille tasoille on asetettu symmetriatasot. Symmetriatasolla on kohtisuora translaatio estetty, muut vapaat ja kohtisuora rotaatio vapaa, muut estetty.



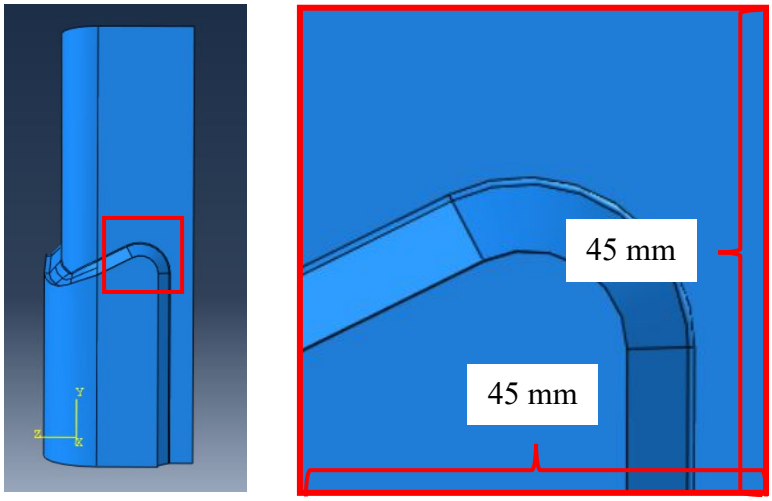
Kuva 9. Symmetriatasot malleissa (punaisella merkitty).

Molemmat koko mallit verkotetaan käyttäen 4-solmuisia tetratilavuuselementtejä, koska geometriat ovat niin monimutkaisia, että heksaelementtiverkkoa olisi todella vaikeaa saada mallinnettua. Tetraelementtejä voidaan myös käyttää mallinnuksessa, kunhan verkko on tarpeeksi tiheä. Alla kuvassa 10 on esitetty molemmat palsalevytyyppien mallit tetraelementtiverkolla.

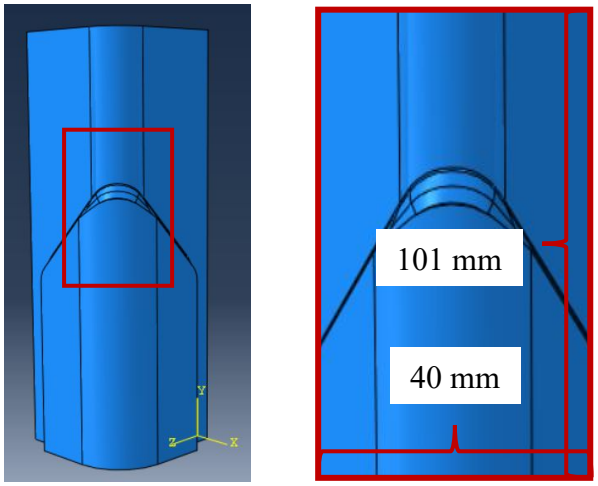


Kuva 10. Molemmat eri palstalevymuotoilut tetraelementtiverkolla ja jännitysjakaumalla.

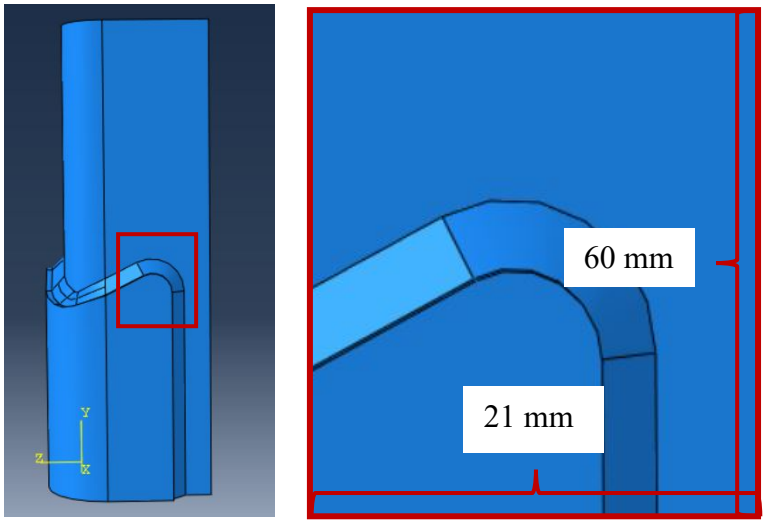
Molemmat mallit analysoitiin tetraelementtiverkolla ja sieltä saaduista tuloksista nähdään mihin maksimijännitykset tulevat. Tulokset esitetty alla kuvassa 11. Kuvista voidaan päätellä mistä alimalli kannattaa ottaa. Oletetusti kärjen kohdalle tulee maksimijännitykset ja siitä otetaan alimalli. Alimallien mitat on esitetty alla kuvissa 11,12,13 ja 14.



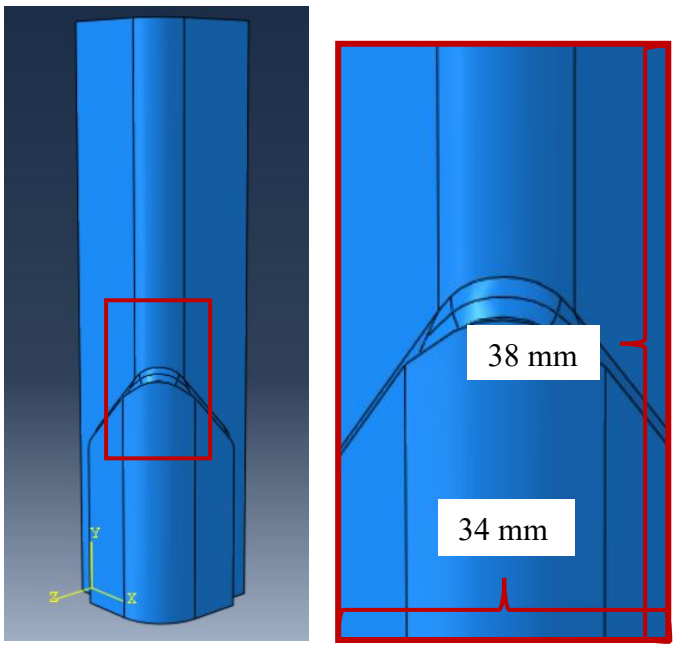
Kuva 11. ENS-alimallin mitat palstalevystä, jossa kärjet kyljissä.



Kuva 12. ENS-alimallin mitat palstalevystä, jossa kärki kulman päällä.



Kuva 13. HS-alimallin mitat palstalevystä, jossa kärjet kyljissä.

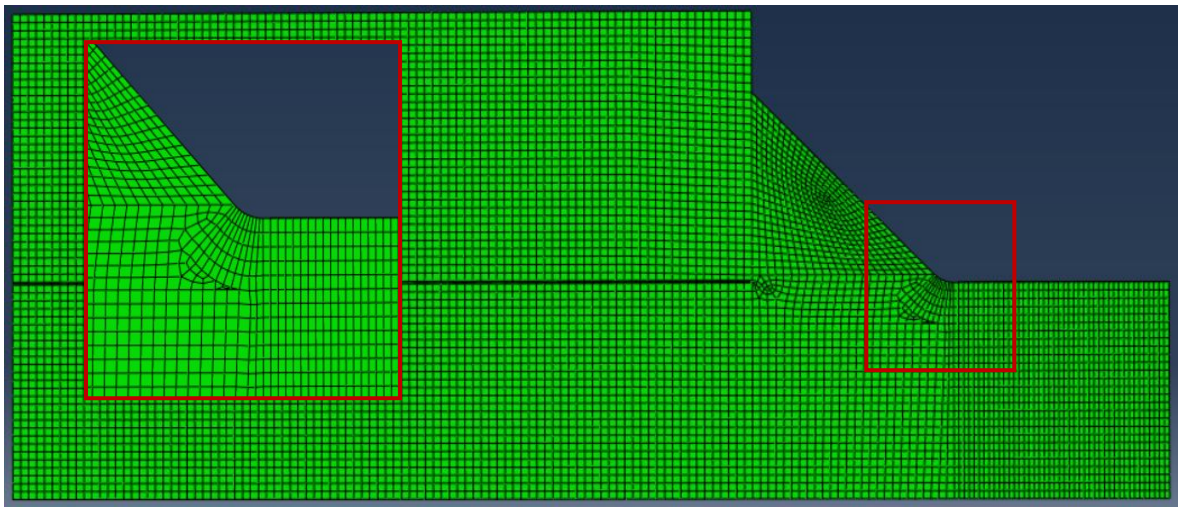


Kuva. 14 HS-alimallin mitat palstalevystä, jossa kärki kulman päällä.

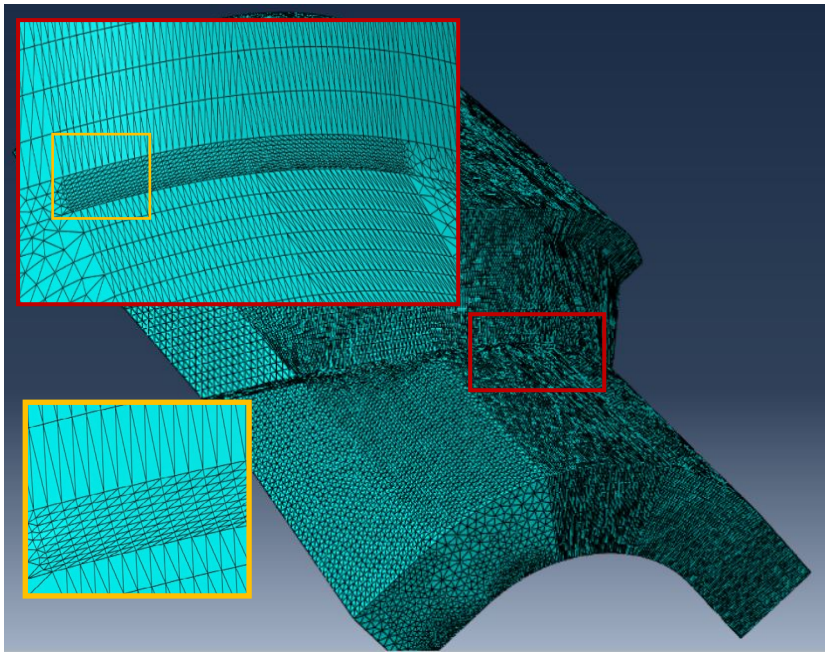
Alimalliin asetetaan jokaiselle sivulle reunaehdot, jotta se ottaa solmusiirtymät ja voimat globaalista mallista. Abaquksessa reunaehdot laitetaan ”kuormana”, mutta tyypiksi valitaan submodel. Nyt alimalli voidaan analysoida ja se antaa todenmukaisia arvoja. Alimalliin voidaan laittaa todella tiheä verkotus ja näin tuloksista saadaan mahdollisimman tarkkoja.

Heksaelementtiverkotus oli suhteellisen helppo mallintaa palstalevygeometriassa, jossa kärjet olivat kyljissä. Kaksi mallia, joissa kärki oli kulman päällä, aiheutti ongelmia ja niihin heksaelementtiverkkoa ei ollut mahdollista saada. Tetraelementtiverkkoa käytetään, koska heksaelementtejä on haastavaa mallintaa monimutkaisille geometrioille. Tetraelementtiverkollakin saadaan tarpeeksi tarkkoja tuloksia, kunhan verkko on tarpeeksi tiheä.

ENS-malleissa laitettiin hitsin rajaviivan pyöristyksen kohdalle 10 elementtiä. Se on puolet enemmän, kuin IIW:n ohjeistuksissa suositellaan, jotta tulokset olisivat luotettavia. Molempien ENS-mallien verkon tiheys hitsin rajaviivalla on esitetty alla kuvissa 15 ja 16.

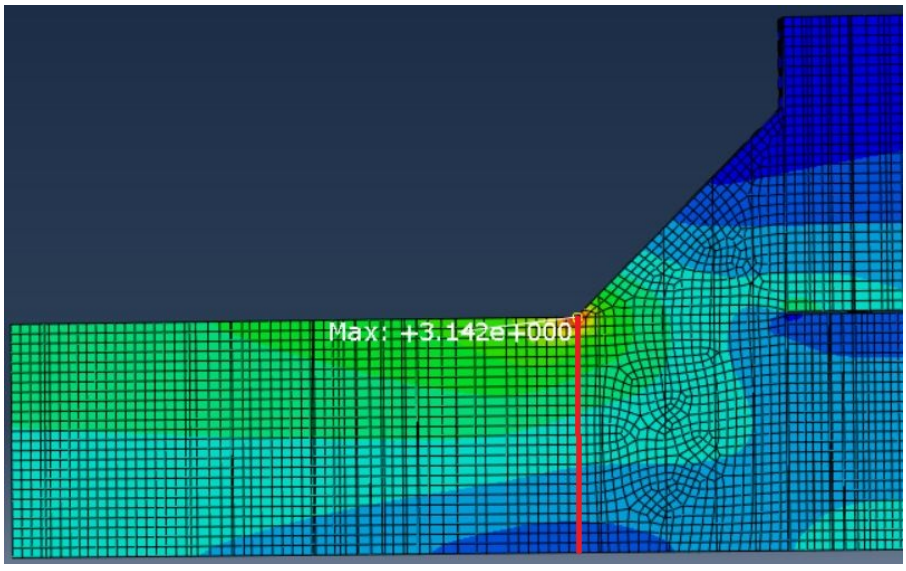


Kuva 15. Heksaelementtiverkko palstalevyssä, jossa kärjet kyljissä. Elementtikoko: 0,08x0,27x0,33 [mm]

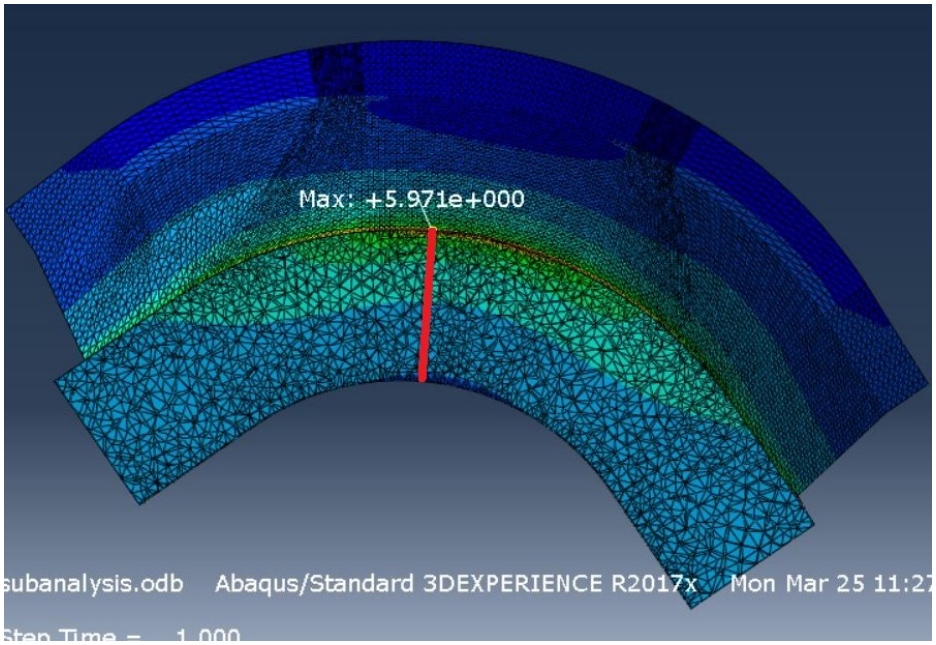


Kuva 16. Tetraelementtiverkko palstalevyssä, jossa kärki kulman päällä. Elementtikoko: 0,08x0,19x0,08 [mm]

Molemmissa HS-malleista jännitykset luettiin paksuuden yli. Heksaelementtiverkko saatiin malliin, jossa kärjet ovat kyljissä ja pisteet olivat jakautuneet säännönmukaisemmin, kuin mallissa, jossa kärki on kulman päällä, koska siinä jouduttiin käyttämään tetraelementtiverkkoa. Alla kuvassa 17 ja seuraavalla sivulla kuvassa 18 on esitetty mistä tulokset on luettu paksuuden yli molemmissa malleissa.



Kuva 17. Kärjet kyljissä, viiva miltä tulokset luettu paksuuden yli. 25 solmupistettä



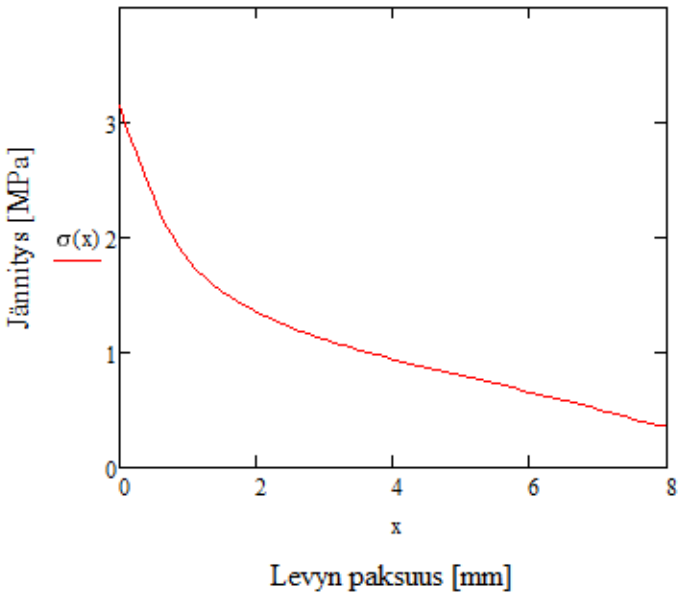
Kuva 18. Kärki kulman päällä, viiva miltä tulokset luettu paksuuden yli. 49 solmupistettä

4. TULOKSET

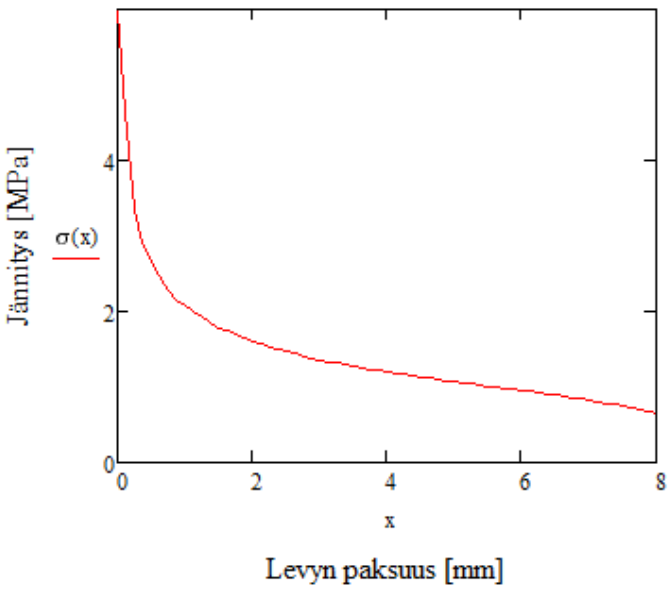
Tässä luvussa esitetään FE-analyysistä saadut tulokset. Luvussa esitetään maksimijännitysten paikka ja lasketaan suhteet jännitysten välillä eri palstalevy tyypeissä. Vaikka toisessa mallissa jouduttiin käyttämään tetraelementtiverkkoa, voidaan tuloksia verrata keskenään, koska verkon tiheys laitettiin riittävän pieneksi ja tuloksista tulivat tarpeeksi tarkat.

4.1 Hot Spot-tulokset

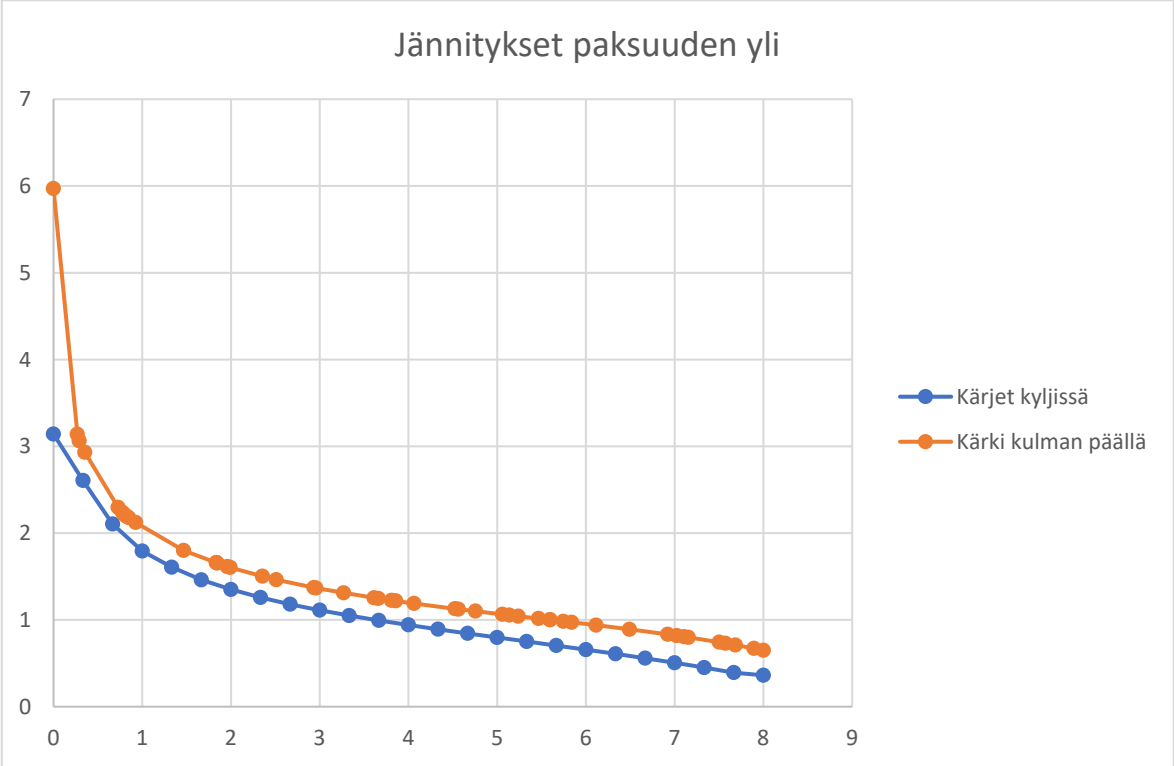
Hot Spot- malleissa laskettiin kalvo- ja taivutusjännitykset erikseen integrointimenetelmällä. Jännityskomponenttien laskenta suoritettiin yhtälöillä 1 ja 2, mitkä on esitetty luvussa 2.1. Jännitysjakaumien sijainti on esitetty aikaisemmin kuvissa 17 ja 18. Jännitysjakauma paksuuden yli molemmista malleista on esitetty alla kuvissa 19 ja 20. Kuvassa 21 on esitetty molempien tapausten jakaumat.



Kuva 19. Jännitys paksuuden yli palstalevyssä, jossa kärjet kyljissä.



Kuva 20. Jännitysjakauma paksuuden yli, jossa kärki kulman päällä.



Kuva 21. Jännitysjakauma paksuuden yli molemmista tapauksista.

Seuraavalla sivulla taulukossa 4 on esitetty Hot Spot-malleista saadut tulokset.

Taulukko 4. Hot Spot-malleista saadut tulokset.

	Kalvojännitys	Taivutusjännitys	Rakenteellinen jännitys
Kärjet kyljissä	1,10 MPa	0,97 MPa	2,07 MPa
Kärki kulman päällä	1,42 MPa	1,08 MPa	2,50 MPa
Suhde	0,77	0,89	0,82

4.2 ENS-tulokset

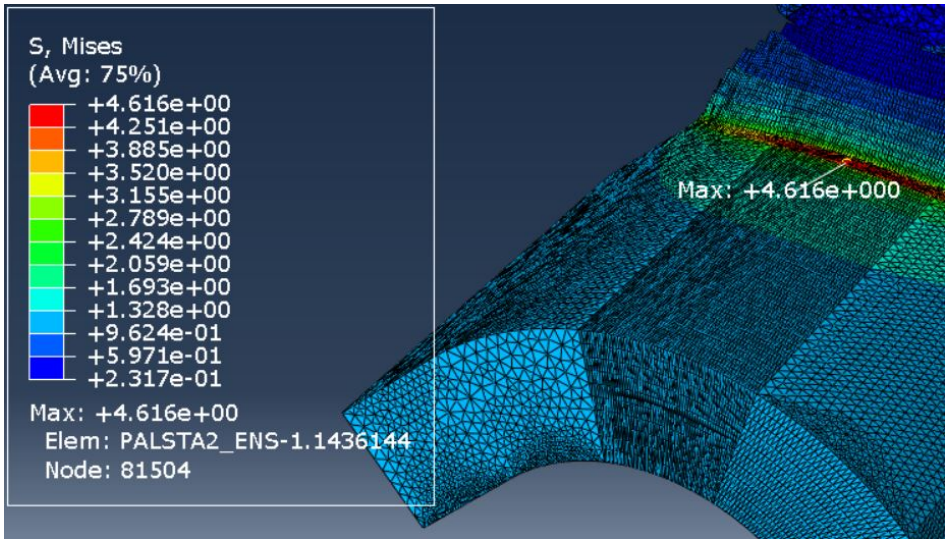
ENS-mallista saadaan suoraan luettua jännitykset ilman tulosten jälkikäsittelyä. Maksimijännityksen paikka on molemmissa malleissa melkein samassa paikassa, eli palstalevyn kärjessä. Niiden sijainti on esitetty seuraavalla sivulla kuvissa 22 ja 23. Alla taulukossa 5 on myös esitetty ENS-malleista saadut tulokset.

Taulukko 5. ENS-malleista saadut tulokset.

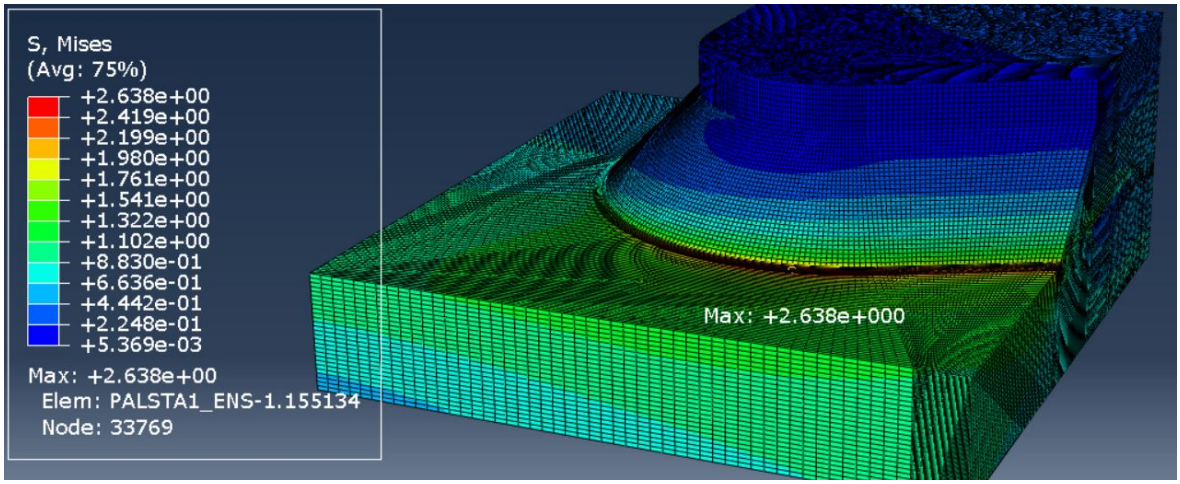
Tyyppi	[1]vM	[2]MPJ
Kärjet kyljissä	2,64 MPa	3,22 MPa
Kärki kulman päällä	4,62 MPa	5,19 MPa
Suhde	0,57	0,62

1) von Mises

2) Maksimipääjännitykset



Kuva 22. Maksimijännityksen paikka palstalevyssä, jossa kärki kulman päällä, von Mises-jännitys



Kuva 23. Maksimijännityksen paikka palstalevyssä, jossa kärjet kyljissä, von Mises-jännitys

5. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin luvussa 4 esitettyjä tuloksia. ENS-malleissa tuloksien erot olivat suuremmat kuin Hot Spot-malleissa. Taulukosta 4 ja 5 saadaan luettua tuloksia ja suhteita jännitysarvojen välillä. Suurimmat jännityskeskittymät syntyivät tapauksessa, jossa kärki oli kulman päällä molemmissa käytetyissä menetelmissä. Suurin jännityskeskittymä oli keskellä kärkeä.

Hot Spot-menetelmässä jännityksien vertailussa laskettiin suhdeluku eli jännitysarvo tapauksessa, jossa kärjet kulman kyljissä jaettuna jännitysarvolla, jossa kärjet olivat kyljissä. Kalvojännityksessä suhdeluku oli 0,77, taivutusjännityksessä 0,89 ja rakenteellisessa jännityksessä 0,82. Erot eivät ole suuret, mutta kumminkin huomioon otettavat.

ENS-menetelmässä von Mises hypoteesia ja maksimipääjännityskriteeriä käyttäessä laskettiin suhdeluku myös samalla tavalla, kuin Hot Spot-menetelmässä. Suhdeluku oli von Mises hypoteesia käyttäessä 0,57, kun taas maksimipääjännityksiä käyttäessä suhdeluku oli 0,62. Jännitys oli melkein kaksi kertaa suurempi tapauksessa, jossa kärki on kulman päällä.

Edellä mainittujen tulosten perusteella tullaan siihen johtopäätökseen, että kärjet kannattaa sijoittaa RHS-putken kylkiin. Jännitysarvot olivat pienemmät ja ENS-menetelmässä oli huomattava ero tapausten välillä.

Kuvissa 19-21 on esitetty jännitysjakaumat ja jakaumat näyttävät oikeilta ja niitä voidaan pitää luotettavina. Jännitysjakauma oli vähän hankalampi lukea paksuuden yli tapauksessa, jossa kärki on kulman päällä koska tetraelementtiverkkoa joudutaan käyttämään.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin miten RHS-putken palstalevyn pääty kannattaa muotoilla. Työssä tarkasteltiin kahta erilaista palstalevyn muotoiluvaihtoehtoa, joista toisessa kärki laitettiin RHS-putken kulman päälle ja toisessa kärjet laitettiin kylkiin. Molemmat tapaukset tutkittiin käyttäen Hot Spot- ja ENS-menetelmää. Geometriamalleja mallinnettiin yhteensä neljä kappaletta. Malleille tehtiin FE-analyysit käyttäen tilavuuselementtejä ja molemmille tapauksille määritettiin syntyneet jännityskonsentraatiokertoimet rakenteellisen ja lovijännityksen tasolla. Toisessa tapauksessa käytettiin tetra- ja toisessa heksaelementtejä. Tämä siksi, että heksaelementtien käyttö tapauksessa, jossa kärki oli kulman päällä, aiheutti paljon haasteita.

Tuloksia analysoitiin luvussa 5 ja tultiin siihen lopputulokseen, että kärjet kannattaa laittaa RHS-putken kylkiin. Erot olivat huomattavia ja jännitykset olivat suurimmillaan melkein kaksi kertaa isommat tapauksessa, jossa kärki laitettiin kulman päälle. Palstalevyn päädyn voisi muotoilla muillakin tavoilla, mutta tässä tapaukset rajattiin kahteen erilaiseen. Kärjen pyöristystä olisi voinut myös muuttaa ja tutkia lisää tapauksia, mutta riittävät tulokset saatiin jo näin.

LÄHTEET

Hobbacher, A. 2014. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. 164 s.

Jonsson, B., Doubmann, G., Hobbacher, A., Kassner, M., Marquis, G. 2016. IIW Guidelines on Weld Quality in Relationship to Fatigue Strength. Springer Nature. 115s.

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Tekninen tiedotus 2/2003. Helsinki: Teknologiateollisuus. 136 s.

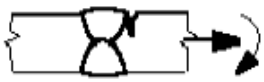
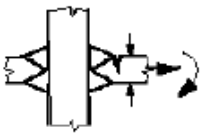
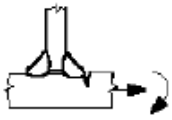
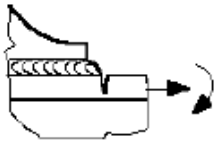
Niemi, E. & Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. 1. painos. Helsinki: Painatuskeskus. 337 s.

Ruukki 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja. Rautaruukki Oyj. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy. Saatavilla verkossa:

http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf Viitattu 17.4.2019

Sonsino, C. M. 2009. A Consideration of Allowable Equivalent Stresses for Fatigue Design of Welded Joints According to the Notch Stress Concept with the Reference Radii rref = 1.00 and 0.05 mm. Welding in the World: 53: 3-4. S. 64-75.

FAT-luokat (mukaillen: Hobbacher, 2014, s. 76).

No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
1		Butt joint	As welded, NDT	100	40
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing	100	40
3		Non load-carrying fillet welds	Transverse non-load carrying attachment, not thicker than main plate, as welded	100	40
4		Bracket ends, ends of longitudinal stiffeners	Fillet welds welded around or not, as welded	100	40
5		Cover plate ends and similar joints	As welded	100	40

Mathcad laskentapohja, kärjet kyljissä

data := READPRN("stress_data_palsta1.txt")

	0
0	3.142
1	2.606
2	2.104
3	1.793
4	1.607
5	1.461
6	1.351
7	1.258
8	1.18
9	1.111
10	1.05
11	0.994
12	0.942
13	0.892
14	0.844
15	...

$\sigma_{data} := data^{\langle 1 \rangle}$

$x_{data} := data^{\langle 0 \rangle}$

	0
0	0
1	0.333
2	0.667
3	1
4	1.333
5	1.667
6	2
7	2.333
8	2.667
9	3
10	3.333
11	3.667
12	4
13	4.333
14	4.667
15	...

$x := 0, 0.125 .. 8 \qquad t := 8$

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

STRESS COMPONENTS TTWT Method

$$\sigma_m := \frac{1}{t} \cdot \int_0^t \sigma(x)\, dx = 1.099$$

$$\sigma_b := \frac{6}{t^2} \cdot \int_0^t (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) dx = 0.97024$$

$$\sigma_{HS} := \sigma_b + \sigma_m = 2.069$$

Mathcad laskentapohja, kärki kulman päällä

data := READPRN("stress_data_palsta2.txt")

$\sigma_{data} := data^{\langle 1 \rangle} =$

	0
0	5.971
1	3.139
2	3.063
3	2.93
4	2.297
5	2.239
6	2.221
7	2.204
8	2.194
9	2.178
10	2.122
11	1.799
12	1.659
13	1.659
14	1.655
15	...

$x_{data} := data^{\langle 0 \rangle} =$

	0
0	0
1	0.269
2	0.289
3	0.354
4	0.728
5	0.776
6	0.792
7	0.809
8	0.823
9	0.847
10	0.927
11	1.466
12	1.835
13	1.835
14	1.845
15	...

$x := 0, 0.125 .. 8 \qquad t := 8$

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

STRESS COMPONENTS TTWT Method

$$\sigma_m := \frac{1}{t} \cdot \int_0^t \sigma(x)\, dx = 1.423$$

$$\sigma_b := \frac{6}{t^2} \cdot \int_0^t \left(\sigma(x) - \sigma_m\right) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) dx = 1.08152$$

$$\sigma_{HS} := \sigma_b + \sigma_m = 2.504$$