



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Teknillinen tiedekunta
LUT Metalli

**TAIVUTUSKUORMITETUN SYLINTERIMÄISEN KUORIRAKENTEEN
LOMMAHDUKSEN PIENOISMALLITUTKIMUS**

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

Ohjaaja: TkT Timo Björk

Lappeenrannassa 24.5.2011

Antti Kojo 0325645

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 TUTKITTAVA RAKENNE	4
2.1 Reunaehdot ja kuormitusilanne	4
2.2 Pienoismalli	5
3 ANALYYTISET LASKELMAT	6
3.1 Kuormitusten skaalaus	6
3.1.1 Ulkoinen kuormitus	7
3.1.2 Siirtymät.....	7
3.2 Lommahduskestävyys	8
4 EMPIIRISET KOKEET	13
4.1 Tukirakenteet	13
4.2 Koejärjestelyt	14
4.3 Kokeen suoritus	19
4.3.1 Esitestaus	19
4.3.2 Kuormitustapa.....	19
5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	20
5.1 Testi 1	21
5.2 Testi 2	25
5.3 Testien vertailu	27
6 JATKOTUTKIMUSAIHEET	30
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	30
LÄHTEET	32
LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

C_x	Kuoren pituudesta ja reunaehdoista riippuva kerroin
d	Putken pienoismallin halkaisija
D	Todellisen rakenteen halkaisija
E	Kimmomoduuli
F_n	Putken suuntaisesti vaikuttava voima
f_p	Pienoismallin painekuorman ekvivalentti resultantti
F_p	Todellisen rakenteen painekuorman ekvivalentti resultantti
f_y	Myötöraja
G	Liukumoduuli
h	Tukikonsolin korkeus
K_1	Dimensioiden skaalauskerroin
l	Putken pienoismallin pituus
L	Todellisen rakenteen pituus
l_m	Momenttivarsi
M	Momentti
P	Ulkoinen painekuorma
Q	Valmistustoleranssiluokka
R_m	Murtoraja
t	Putken pienoismallin seinämän paksuus
T	Todellisen rakenteen seinämän paksuus
ν	Poissonin luku
X	Putken suuntaisen voiman epäkeskeisyys
x	Tukikonsolin vaakasiirtymä
α	Kimmoisen tilan epätarkkuuden pienennystekijä
β	Plastisen alueen pienennystekijä
δ_t	Pienoismallin siirtymä
δ_T	Todellisen rakenteen siirtymä
Δw_k	Epätarkkuusamplitudin ominaisarvo
$\delta_{y,meas}$	Mitattu putken pään siirtymä
ε_z	Meridiaanivenymä
ε_ϕ	Tangentiaalivenymä

λ_0	Puristusrajahoikkuus
λ_p	Plastista rajaa vastaava muunnettu hoikkuus
λ_x	Aksiaalista kuormitusta vastaava muunnettu hoikkuus
σ_ϕ	Tangentiaalijännitys
$\sigma_{b,p}$	Painekuorman aiheuttama taivutusjännitys
$\sigma_{b,x}$	Putken suuntaisen voiman aiheuttama taivutusjännitys
σ_n	Putken suuntaisen voiman aiheuttama puristusjännitys
σ_{Rc}	Lommahduksen mitoitusarvo
σ_{Rk}	Lommahdusjännityksen ominaisarvo
σ_{tot}	Pienoismallin kokonaisjännitys
σ_{TOT}	Todellisen rakenteen kokonaisjännitys
$\sigma_{x,Rcr}$	Kriittinen lommahdusjännitys
σ_z	Meridiaanijännitys
$\sigma_{z,global}$	Gloaalijännitys
χ	Lommahduksen pienennyskerroin
ω	Kuorisegmentin dimensioton pituusparametri

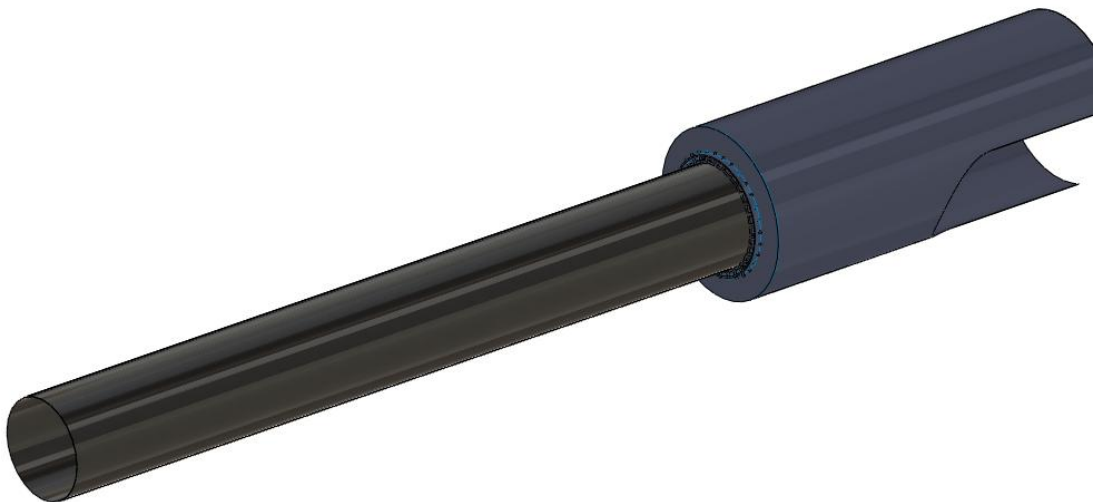
1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä on tutkittu taivutuskuormitetun, säteittäisesti tuetun, sylinterikuoren lommahduskestävyyttä. Työssä tutkittava rakenne tulee lopullisessa käyttökohteessaan olemaan huomattavan suurikokoinen, joten täysikokoista rakennetta ei ole järkevää ruveta tutkimaan varsinkaan empiirisillä menetelmillä. Niinpä rakenteesta on valmistettu pienoismalli, jonka lommahduskestävyyttä on tutkittu analyttisillä laskentamenetelmillä, sekä LUT Metallin teräsrakennelaboratoriossa tehdyillä empiirisillä kokeilla.

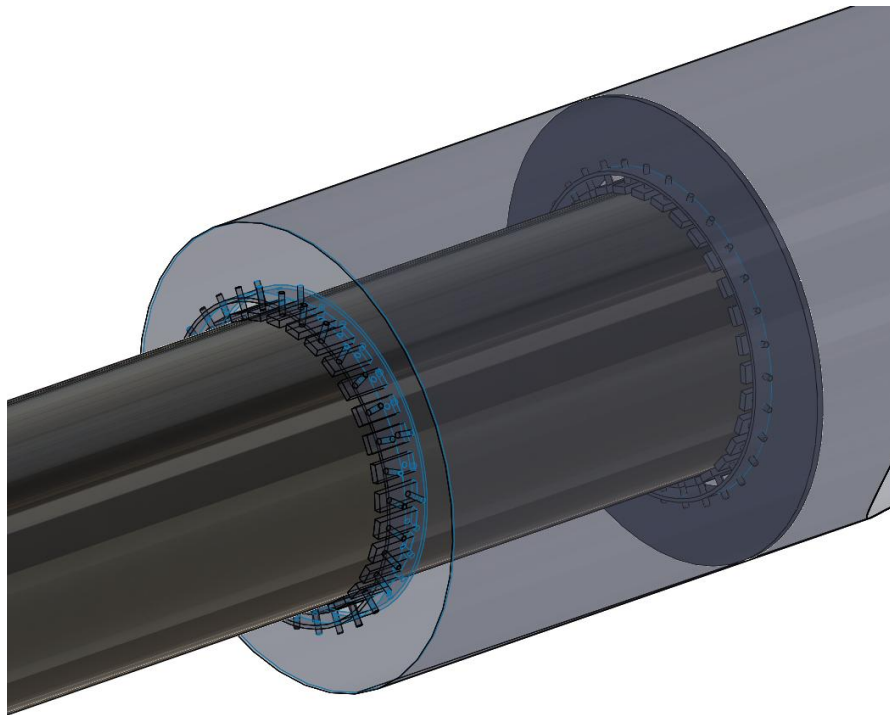
2 TUTKITTAVA RAKENNE

2.1 Reunaehdot ja kuormitusilanne

Tutkittava rakenne on ohutseinämäinen sylinterikuori, joka on sovitettu toisen suuremman lieriön sisään. Rakenne on esitetty kuvassa 1. Ulompi tukilieriö oletetaan alareunastaan kehän jokaisesta pisteestä kiinteästi tuetuksi. Suuremmassa lieriössä on läpiviennit sisemmälle putkelle, joihin on valmistettu säteittäis-suunnassa kiristettävät liukupalat. Nämä säteittäistuet on esitetty kuvassa 2. Tutkittava putki on siis kahdesta kohtaa tuettu säteittäis-suuntaisesti 32 liukupalalla. Ylätuki sijaitsee pienoismallissa 1000 mm korkeudella putken alareunasta ja alatuki aivan putken alareunan tasalla.

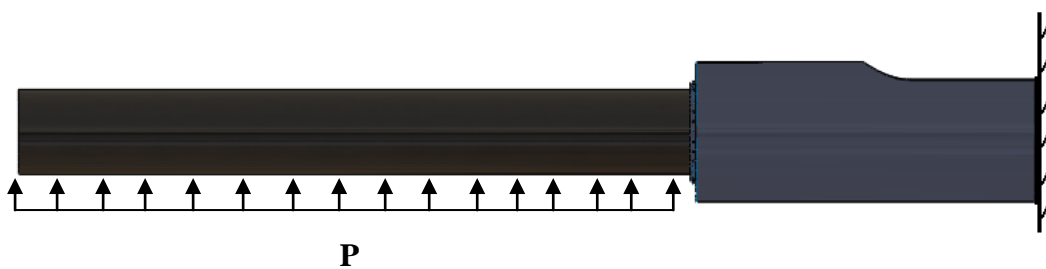


Kuva 1. Tutkittavan rakenteen 3-D malli



Kuva 2. Lähikuva säteittäistuista

Rakenteen kuormitettavuutta tutkitaan sen ollessa altistettuna tasan jakautuneelle ulkoiselle painekuormalle koko sen vapaan pituuden matkalta. Kuormitustilanne on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Yksinkertaistettu kuvaus kuormitustilanteesta

2.2 Pienoismalli

Todellisen rakenteen huomattavan suuresta koosta johtuen, on rakenteen tutkimisen helpottamiseksi valmistettu siitä pienoismalli. Tätä tutkimusta varten on pienoismallia

suunnitellessa päädytty käyttämään 1:10 mittakaavaa. Pienoismallin dimensiot ovat siis kaikki kymmenesosia todellisesta rakenteesta. Pienoismallin dimensiot ovat seuraavat:

- Pituus $l = 6000$ mm
- Halkaisija $d = 610$ mm
- Seinämäpaksuus $t = 4$ mm

Rakenne on valmistettu kylmävalssatusta AISI 304 teräksestä, jonka lujuus- ja kimmo- ominaisuudet ovat seuraavat (SFS-EN 1993-1-4 2006, 9-10):

- Materiaalintoimittajan ilmoittama myötölujuus $f_y = 322,5$ MPa
- Materiaalintoimittajan ilmoittama murtolujuus $R_m = 613$ MPa
- Kimmomoduuli $E = 200$ GPa
- Poissonin luku $\nu = 0,3$
- Liukukerroin $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 77$ GPa

3 ANALYYTISET LASKELMAT

3.1 Kuormitusten skaalaus

Jotta tutkimuksesta saatavia tuloksia pystyttäisiin soveltamaan todellisen kokoisen rakenteen kestävyyttä arvioidessa, on tarpeen selvittää kuinka kuormitukset, rakenteen deformaatiot ja siihen syntyvät jännitykset skaalautuvat todelliseen rakenteeseen.

Lopullisessa sijoituskohteessaan rakenteen päähän vaikuttaa epäkeskeisesti putken suuntainen kuormitus F_n , joka aiheuttaa putken päähän pistemomentin. Voimien skaalauslaskelmissa tämä kuormitus on varmuuden vuoksi otettu huomioon, vaikka se on työn muissa osioissa jätetty huomioimatta.

3.1.1 Ulkoinen kuormitus

Analyttisten laskelmien ja empiiristen kokeiden yksinkertaistamiseksi, korvataan tasan jakautunut painekuorma P putken päässä vaikuttavalla ekvivalentilla poikittaisresultantilla F_p . Todellisessa rakenteessa:

$$F_p = P \cdot D \cdot L$$

Koska pienoismallissa mitat ovat kymmenesosa todellisista dimensioista, saadaan pienoismallin ekvivalentti resultantti f_p kaavasta

$$f_p = P \cdot \frac{D}{10} \cdot \frac{L}{10} = \frac{F_p}{100}$$

Tästä nähdään, että pienoismalliin kohdistuvat voimat ovat sadasosa todelliseen rakenteeseen kohdistuvista voimista.

3.1.2 Siirtymät

Toisesta päästään kiinteästi tuetun putkipalkin pään siirtymä, tasaisesti jakautuneen ulkoiseen paineen, sekä palkin päähän kohdistuvan pistemomentin alaisena saadaan kaavasta:

$$\delta_T = \frac{PDL^4}{K_1 2E\pi D^3 T} + \frac{F_n XL^2}{K_1 2E\pi D^3 T} = \frac{L^2}{2E\pi D^3 T} \left(\frac{PDL^2}{K_1} + \frac{FX}{K_1} \right)$$

Pienoismallin tapauksessa merkitään nyt dimensiot kymmenesosina ja selvitetään skaalautumiskerroin K_1 .

$$\delta_t = \frac{L^2 10000}{1002 E\pi D^3 T} \left(\frac{PDL^2}{1000} + \frac{FX}{1000} \right) = \frac{L^2}{2E\pi D^3 T} \left(\frac{PDL^2}{10} + \frac{FX}{10} \right) \Rightarrow K_1 = 10$$

Pienoismallin siirtymät vastaavat siis kymmenesosa todellisen rakenteen siirtymistä.

3.1.3 Jännitykset

Tutkitaan vielä rakenteeseen syntyvät jännitykset. Todellisen rakenteen kokonaisjännitys koostuu painekuorman aiheuttamasta taivutusjännityksestä $\sigma_{b,p}$, putken suuntaisen voiman puristusjännityksestä σ_n sekä putken suuntaisen voiman epäkeskeisyydestä johtuvasta taivutusjännityksestä $\sigma_{b,x}$. Rakenteen kokonaisjännitys σ_{tot} saadaan kaavoista:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{b,p} + \sigma_n + \sigma_{b,x} = \frac{M}{W} + \frac{F}{\pi DT} + \frac{2FX}{\pi D^2 T} = \frac{PL^2}{\pi DT} + \frac{F}{\pi DT} + \frac{2FX}{\pi D^2 T} = \frac{1}{\pi DT} \left(2PL^2 + F + \frac{2FX}{D} \right)$$

Pienoismallin kokonaisjännitys:

$$\begin{aligned} \sigma_{tot} &= \frac{1}{\pi \frac{D}{10} \cdot \frac{T}{10}} \left[2P \left(\frac{L}{10} \right)^2 + \frac{F}{100} + \frac{2 \frac{F}{100} \cdot \frac{X}{10}}{\frac{D}{10}} \right] = \frac{100}{\pi DT} \left[2P \frac{L^2}{100} + \frac{F}{100} + \frac{2FX}{100D} \right] \\ &= \frac{1}{\pi DT} \left(2PL^2 + F + \frac{2FX}{D} \right) \end{aligned}$$

Syntyvät jännitykset ovat siis yhtä suuret pienoismallissa kuin todellisessa rakenteessa.

3.2 Lommahduskestävyys

Tasan jakautunut ulkoinen painekuorma on siis redusoitu pistemäiseksi poikittaiskuormaresultantiksi F_p . Työn tässä osiossa on pyritty laskennallisesti selvittämään, kuinka suuri kuvassa 4 esitetty poikittaiskuorma F_p saa olla ennen kuin rakenne menettää kantokykynsä.



Kuva 4. Kuormitustilanne

Kuoren lommahduskestävyyden analyttiseen määrittämiseen on käytetty standardia SFS-EN 1993-1-6. 2007. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-6. Kuorirakenteiden lujuus ja stabiilius.

Kimoteorian mukainen, kylkiviivan suuntainen, kriittinen lommahdusjännitys aksiaalisesti taivutetulle sylinterikuorelle saadaan kaavasta

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} \quad (1)$$

jossa E = materiaalin kimmomoduuli ($E_{\text{AISI 304}} = 200 \text{ GPa}$)

C_x = Kuoren pituudesta ja reunaehdoista riippuva kerroin

t = Kuoren paksuus ja

r = Kuoren säde.

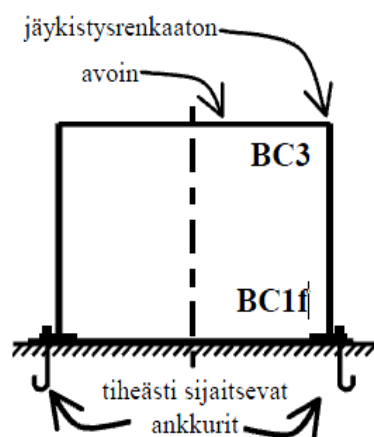
Kuorisegmentin dimensioton pituusparametri $\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}} = \frac{6000}{\sqrt{305 \cdot 4}} = 171,77$, kyseessä on siis

pitkä lieriö. Tällöin kertoimen C_x arvoksi saadaan $C_{x,N}$, joka on suurempi arvoista:

$$C_{x,N} = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \quad (2)$$

$$C_{x,N} = 0,60 \quad (3)$$

Valitaan reunaehdon huomioivaksi kertoimeksi C_{xb} lähimpänä todellista tilannetta vastaava arvo. Tällöin joudutaan yksinkertaistamaan tilannetta siten, että oletetaan kuoren olevan toisesta päästään kiinteästi tuettu, ja toisesta päästään vapaareunainen. Tällöin kertoimen C_{xb} arvoksi tulee $C_{xb} = 3$. Valitut reunaehdot on esitetty kuvassa 5.



d) avoin ankkuroitu säiliö

Kuva 5. Reunaehtojen yksinkertaistus standardin soveltamista varten (SFS-EN 1993-1-6, 33)

Kaavasta (2) laskemalla saamme kertoimen $C_{x,N}$ arvoksi

$$C_{x,N} = 1 + \frac{0,2}{3} \left[1 - \left(2 \cdot 171,77 \cdot \frac{4}{305} \right) \right] = 0,766$$

Ja edelleen kaavasta (1) saamme kriittiseksi lommahdusjännitykseksi

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \cdot (200 \cdot 10^3) \cdot 0,766 \cdot \frac{4}{305} = 1215,55 \text{ MPa}$$

Tutkittavan rakenteen aksiaalista kuormitusta vastaava muunnettu hoikkuus saadaan kaavasta:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{322,5}{1215,55}} = 0,515 \quad (4)$$

Seuraavaksi määritetään rakenteen plastista rajaa vastaava muunnettu hoikkuus kaavasta:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (5)$$

missä α = kimmoisessa tilassa vaikuttava epätarkkuuden pienennystekijä

β = Plastisen alueen pienennystekijä 0,60

Kimmoisessa tilassa vaikuttava epätarkkuuden pienennystekijä α saadaan kaavasta:

$$\alpha = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{\Delta w_k}{t} \right)^{1,44}} \quad (6)$$

missä Δw_k = epätarkkuusamplitudin ominaisarvo

epätarkkuusamplitudin ominaisarvo saadaan kaavasta:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t \quad (7)$$

missä Q = valmistustoleranssiluokan parametri. Varmuuden vuoksi valitaan valmistustoleranssiluokaksi normaali, jolloin $Q=16$.

Epätarkkuusamplitudin ominaisarvo kaavan (7) mukaan:

$$\Delta w_k = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{305}{4}} \cdot 4 = 2,18$$

Kimmoisessa tilassa vaikuttava epätarkkuuden pienennystekijä kaavan (6) mukaan:

$$\alpha = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{2,18}{4} \right)^{1,44}} = 0,344$$

Rakenteen plastista rajaa vastaava muunnettu hoikkuus kaavasta (5):

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{0,344}{1 - 0,60}} = 0,927$$

Rakenteen puristusrajahoikkuus $\bar{\lambda}_0=0,2$. Koska nyt $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p$ saadaan lommahduksen pienennyskerroin kaavasta:

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right) = 1 - 0,60 \cdot \left(\frac{0,515 - 0,2}{0,927 - 0,2} \right) = 0,740 \quad (8)$$

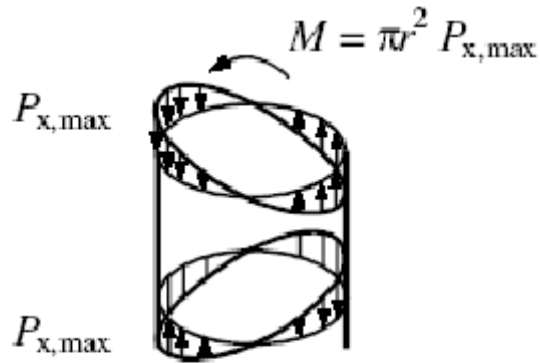
Lommahdusjännityksen ominaisarvo saadaan kaavasta:

$$\sigma_{Rk} = \chi \cdot f_y = 0,740 \cdot 322,5 = 238,66 \text{ MPa} \quad (9)$$

Lommahduksen mitoitusarvo on tällöin:

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{238,66}{1,1} = 216,96 \text{ MPa} \quad (10)$$

A.2.2 Kuoreen vaikuttavasta taivutusmomentista aiheutuva aksiaalinen kuorma



$$\sigma_x = \pm \frac{M}{\pi r^2 t}$$

Kuva 6. Taivutusmomentin aiheuttama aksiaalinen kuorma (SFS-EN 1993-1-6, 50)

Lommahdusjännityksen mitoitusarvoa vastaava kuormitusmomentti on siis:

$$M = \sigma_{Rd} \cdot \pi r^2 t = 216,96 \cdot \pi \cdot 305^2 \cdot 4 = 253,63 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 253,63 \text{ kNm} \quad (11)$$

Tällöin suurin sallittu poikittaiskuorma on:

$$F_{\max} = \frac{M}{l_M} = \frac{253,63}{5} = 50,73 \text{ kN} \quad (12)$$

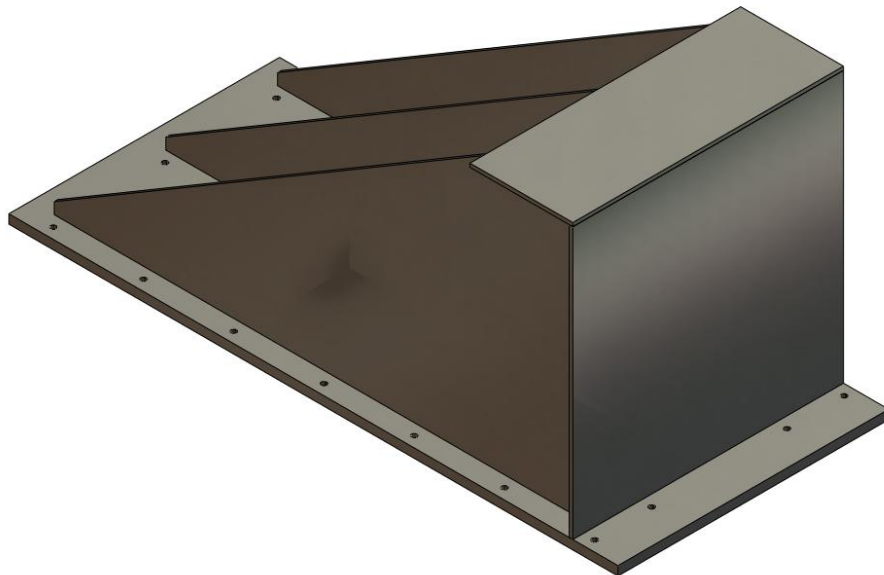
missä l_M = taivutuksen momenttivarsi.

4 EMPIIRISET KOKEET

Analyttisten laskelmien lisäksi rakenteen kestävyyttä tutkittiin siitä tehdyn 1:10 pienoismallin avulla. Testauksessa putken vapaaseen päähän kohdistuvaa poikittaiskuormaa kasvatettiin kvasistaattisesti, kunnes rakenne menetti kantokykynsä. Kuormituksen aikana mitattiin reaaliaikaisesti siihen syntyneet siirtymät, jännitykset, sekä rakenteeseen kohdistettu kuormitus.

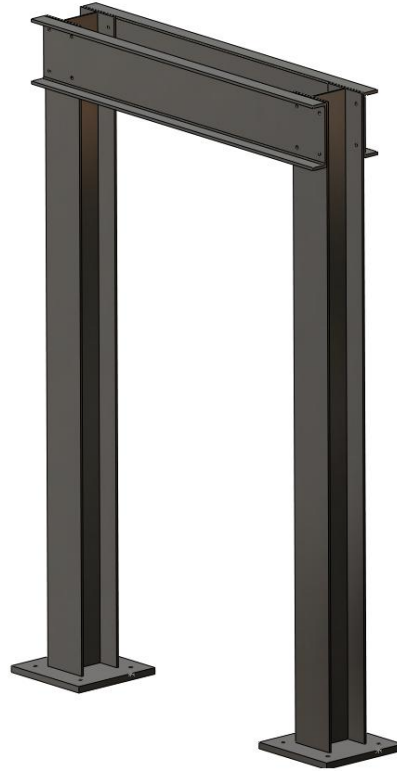
4.1 Tukirakenteet

LUT Metallin teräsrakennelaboratorion rajallisesta koosta johtuen, koe jouduttiin toteuttamaan vaakatasossa. Tällaisen testauksen toteuttamiseksi tutkittavalle rakenteelle valmistettiin tukikonsoli, joka mahdollisti rakenteen riittävän tukevan kiinnittämisen laboratorion T-uralattiaan. Kuvassa 7 esitetty konsoli valmistettiin levyaihioista suuren L-kirjaimen muotoiseksi ja siihen hitsattiin jäykistelevyt ottamaan vastaan testauksessa syntyvää puristuskuormaa. Tukisylinterin kiinnityshitsauksessa pyrittiin saavuttamaan hyvä läpihitsautuvuusaste tasalujuuden varmistamiseksi.



Kuva 7. Tukikonsolin 3D-malli

Testauksessa kuormitus haluttiin toteuttaa ylöspäin, jolloin putken pään siirtymä ei pääse rajoittamaan testausta. Tämän mahdollistamiseksi kuormituslaitteelle valmistettiin Kuvan 8 mukainen tukikehä IPE-300 palkeista, joihin liitettiin ruuviliitoksella UNP 400-profiilit poikkipalkeiksi.



Kuva 8. Tukikehän 3D-malli

4.2 Koejärjestelyt

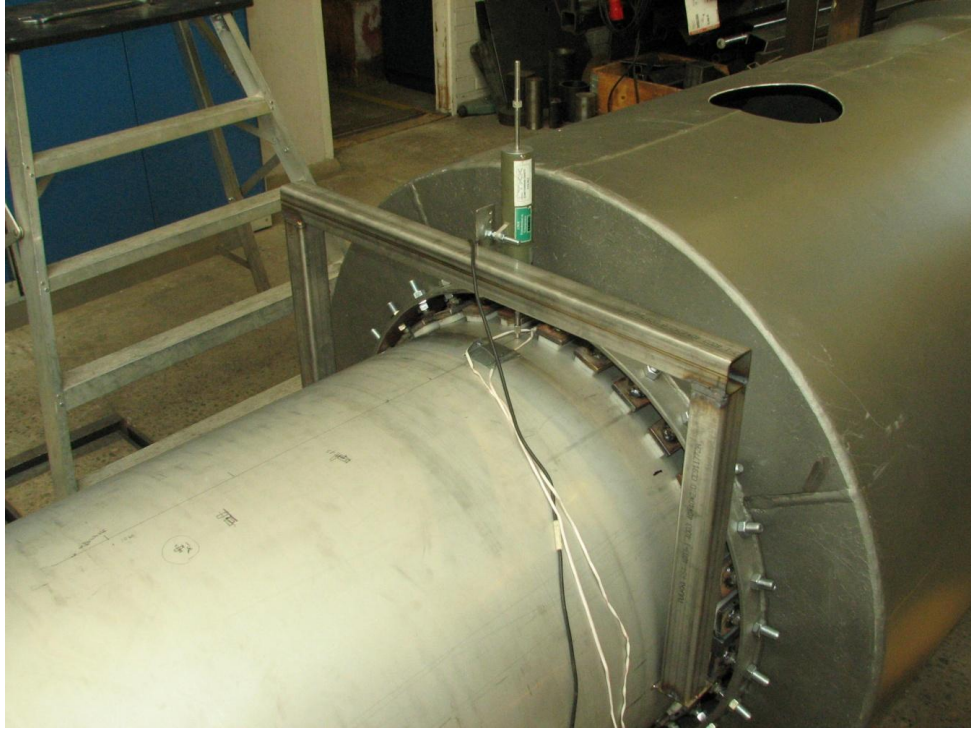
Testausta varten sekä tukikehä että tukikonsoli kiinnitettiin laboratorion T-uralattiaan ja hitsattiin rakenteen tukilieriö tukikonsoliin kiinni. Tämän jälkeen asennettiin tukipalat likimain tutkittavan putken halkaisijan määräämälle etäisyydelle toisistaan. Seuraavaksi sovitettiin putki läpivienneistä sisään ja varmistettiin sen kohtisuoruus sekä pysty- että vaakasuuntiin. Tukipalat kiristettiin kosketuskireyteen tutkittavan putken pinnalle.

Kuormitus toteutettiin tukikehän päälle asennetulla hydraulitunkilla, josta voima johdettiin putken päähän yksinkertaisella tappiliitoksella. Kuormittavaa voimaa mitattiin voima-anturilla ja putken pään siirtymää elektronisella siirtymäanturilla. Kuormituslaitteisto on esitetty kuvassa 9.



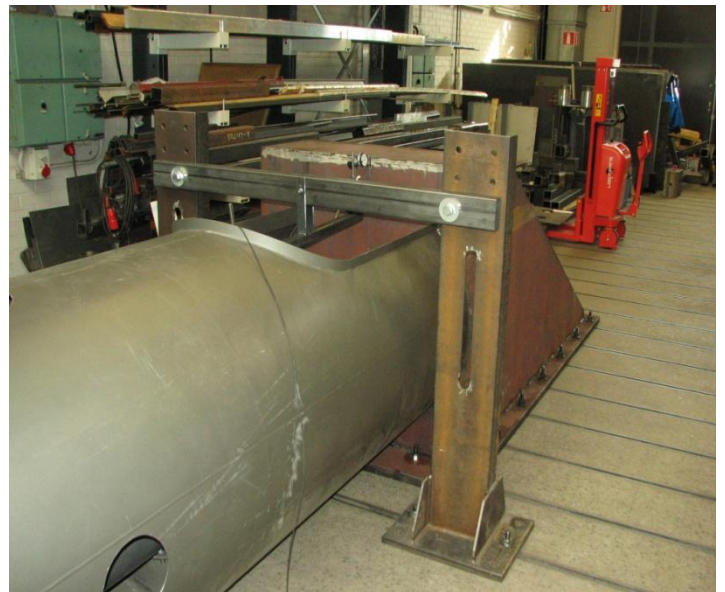
Kuva 9. Kuormituslaitteisto

Ylemmän tuen läheisyyteen syntyvän lommon syvyys mitattiin elektronisella siirtymäanturilla kuvan 10 mukaisesti. Tätä anturia varten putkeen kiinnitettiin teline, jonka avulla pystyttiin mittaamaan vain lommon syvyys ilman että itse putken siirtymä vaikuttaa siihen.



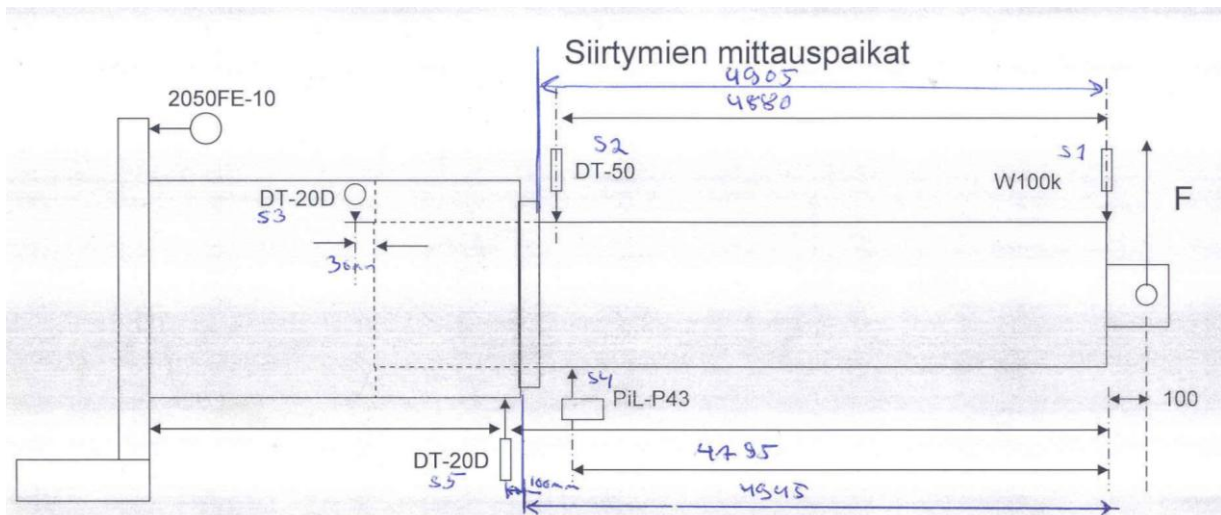
Kuva 10. Lommon syvyyttä mittaava anturi

Jotta putken liikkeitä kuormitusolotilanteissa pystyttäisiin analysoimaan mahdollisimman tarkasti, mitattiin myös putken alapään siirtymä pystysuunnassa. Tämä toteutettiin hitsaamalla putken alapäähän pieni teräsliuska, jonka siirtymää mitattiin lattiaan maadoitettuun telineeseen kiinnitetyn anturin avulla. Mittausjärjestelyt kuvassa 11.



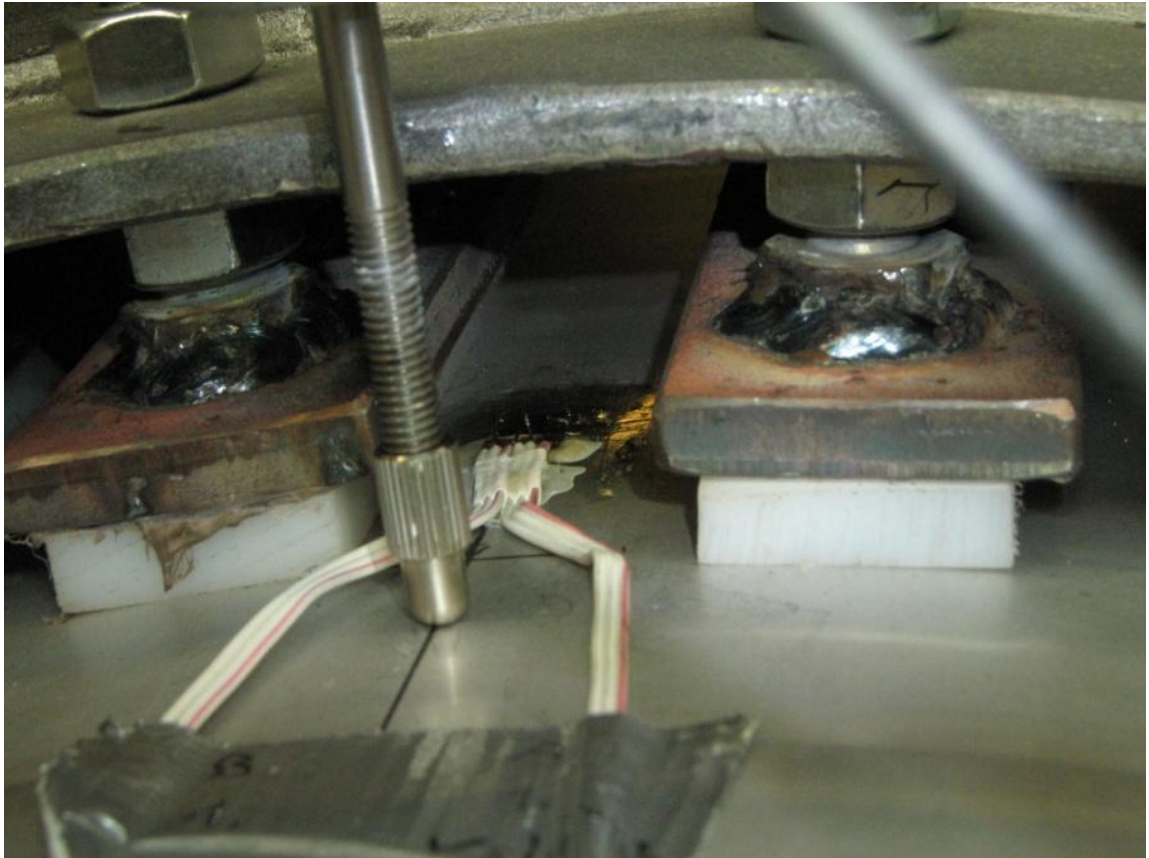
Kuva 11. Putken alapään siirtymää mittaava anturi ja sen teline

Lisäksi elektronisella siirtymäanturilla mitattiin tukisynterän yläreunan pystysuuntainen siirtymä. Tutkittavan putken pystysiirtymä mitattiin ultraäänianturilla ja tukikonsolin päädyn vaakasuuntainen siirtymä mitattiin manuaalisesti luettavalla mittakellolla. Siirtymäanturien tarkat sijainnit käyvät ilmi kuvasta 12.

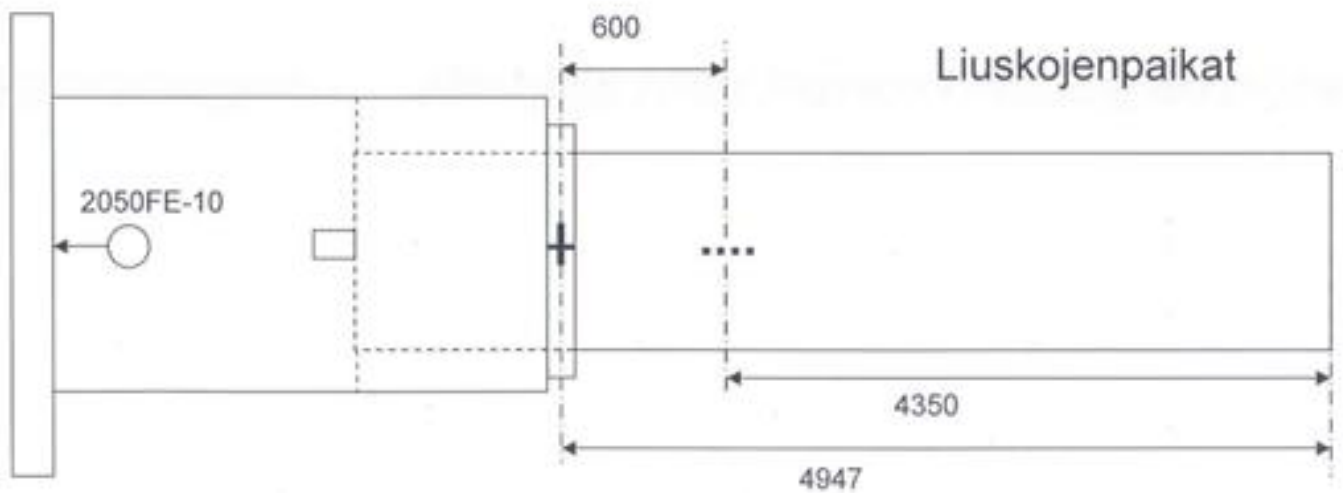


Kuva 12. Siirtymäanturien sijainnit mittauspöytäkirjasta

Siirtymien lisäksi testauksen yhteydessä mitattiin rakenteeseen syntyviä jännityksiä. Kriittisimmäksi paikaksi jännitysten suhteen arvioitiin putken yläpintaan kohdistuvat tukipalat. Koska venymäliuskojen vaurioitumisen pelossa niitä ei uskallettu sijoittaa palojen alle, päädyttiin mittaamaan jännitykset tukipalojen välistä. Mittaukseen käytettiin kuvassa 13 esitettyä XY-liuskaa, jolla voidaan mitata samanaikaisesti sekä meridiaani- että tangetiaalisiin jännitykset. Lisäksi mitattiin vertailujännityksenä rakenteeseen syntyvä globaalijännitys putken alapinnalta, 600 mm päästä ylätueltä. Venymäliuskojen tarkat paikat käyvät ilmi kuvasta 14.



Kuva 13. Tukipalojen väliin asennettu XY-venymäliuska



Kuva 14. Venymäliuskojen sijainti mittauspöytäkirjasta

4.3 Kokeen suoritus

Tutkittavan rakenneosan symmetrisyydestä johtuen suunniteltiin testaus toteutettavaksi kahteen kertaan. Ensimmäisen testin jälkeen putki siis käännettiin ympäri ja testattiin myös putken toinen pää.

4.3.1 Esitestaus

Ennen varsinaista testausta suoritettiin ns. esitestaus, jossa varmistettiin kaikkien anturien sekä kuormituslaitteiston toimivuus. Esitestauksessa rakennetta kuormitettiin 10kN asti aina yksi kN kerrallaan. Jokaisen kuormitusinkrementin jälkeen tarkistettiin kaikkien anturien antamat lukemat ja kirjattiin ne ylös.

4.3.2 Kuormitustapa

Varsinaisessa testauksessa käytettiin ensimmäisellä kerralla 5 kN kuormitusinkremettejä rakenteen elastisella alueella. Kun rakenteen arvioitiin alkavan käyttäytyä plastisesti, pienennettiin inkrementtiä 2,5 kN:iin. Toisessa testissä lineaarinen alue ajettiin 10 kN:in kuormitusinkrementeillä. Plastisella alueella käytettiin edelleen 2,5 kN:in inkrementtejä.

Varmuuden vuoksi siirtymäanturien ja venymäliuskojen tulokset kirjattiin ylös manuaalisesti jokaisen kuormitusinkrementin välissä.

Kuormituslaitteena käytetyn hydraulisylinterin rajallisesta iskunpituudesta johtuen, jouduttiin molemmissa kokeissa pysäyttämään kuormitus n. 40 kN:in kohdalla ja säätämään sylinterin iskua. Tämä näkyy koetuloksissa pienenä notkahduksena voiman tuonnissa n. 40 kN:in kohdalla.

5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Mittaustuloksina testeistä saatiin raaka-dataa, joka muunnettiin helpommin tulkittavaan muotoon Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmalla. Käytännössä tämä tarkoittaa testausjärjestelyistä ja mittauslaitteistosta johtuvien epätarkkuuksien suodattamista, sekä venymäliuskojen antamien venymäarvojen linearisoimista jännitystä vastaaviksi pseudovenymiksi. Rakenteen menetettyä stabiiliutensa liuskojen mittaava venymä käyttäytyy erittäin epälineaarisesti, mistä johtuen lommahduksen jälkeen jännitysarvot kasvavat holtittomasti eivätkä korreloi enää todellisen tilanteen kanssa.

Liuskojen arvot ovat linearisoitu tasojännityslausekkeilla seuraavasti:

$$\text{Meridiaanijännitys } \sigma_z = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\phi)$$

$$\text{Tangenciaalijännitys } \sigma_\phi = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z)$$

Koska todellisessa rakenteessa tukirakenteet oletetaan täysin liikkumattomiksi, on putken pään siirtymästä eliminoitu tukikonsolin pystylevyn kiertymän aiheuttama osuus. Tukikonsolin siirtymää mitattiin manuaalisesti luettavalla mittakellolla ja sen lukemat on kirjattu ylös vain jokaisen kuormitusinkrementin jälkeen. Puuttuvat arvot on laskelmiin arvioitu rakenteen lineaarisen käyttäytymisen perusteella.

Näin ollen pelkkä putken pään siirtymä saadaan kaavasta:

$$\delta_{y,tot} = \delta_{y,meas} - \left[\arcsin\left(\frac{x}{l_2}\right) \cdot l_1 \right]$$

missä $\delta_{y,meas}$ = Putken pään mittaustulos

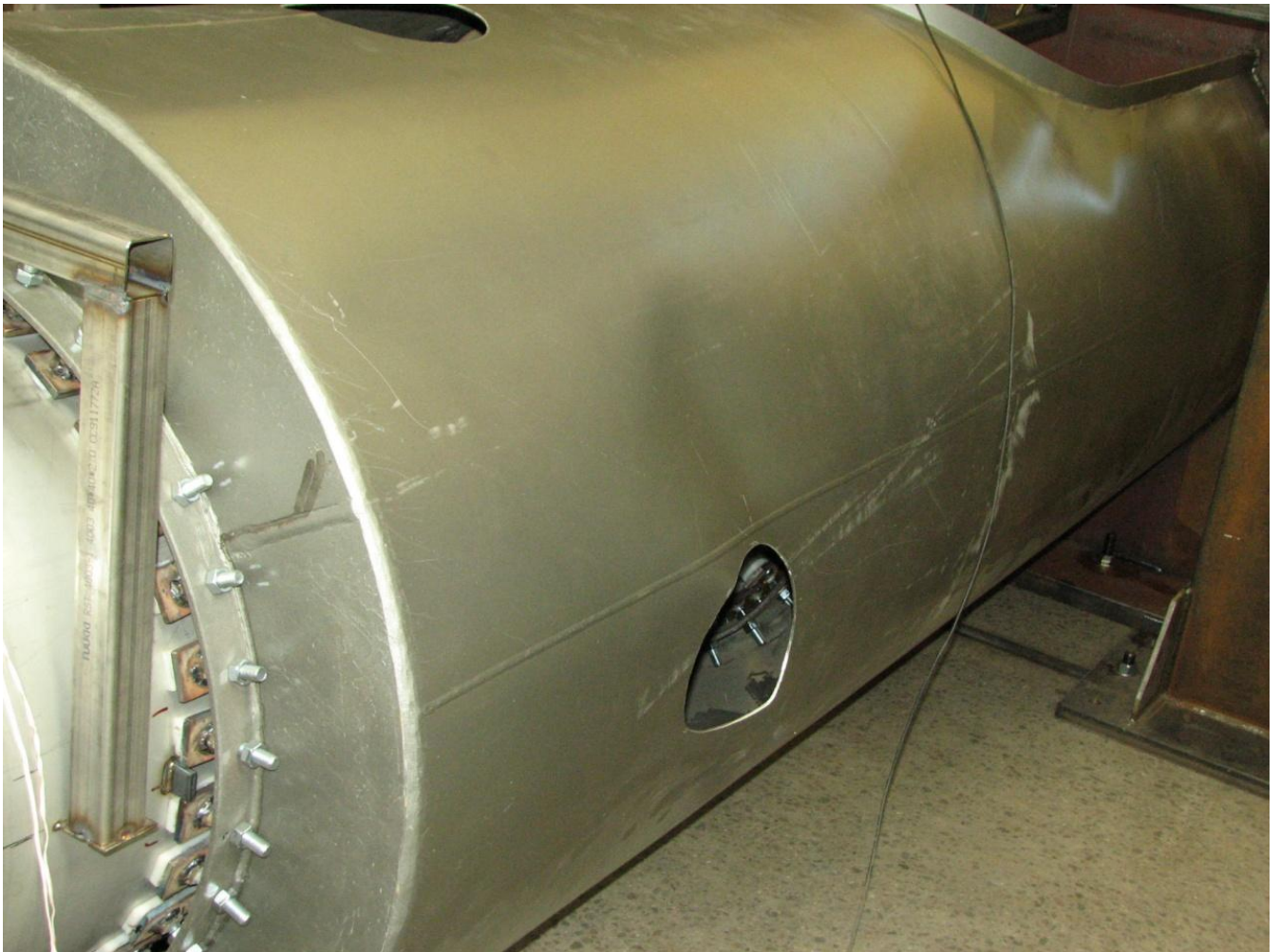
x = Tukikonsolin pystylevyn siirtymä

l_1 = Putken pituus

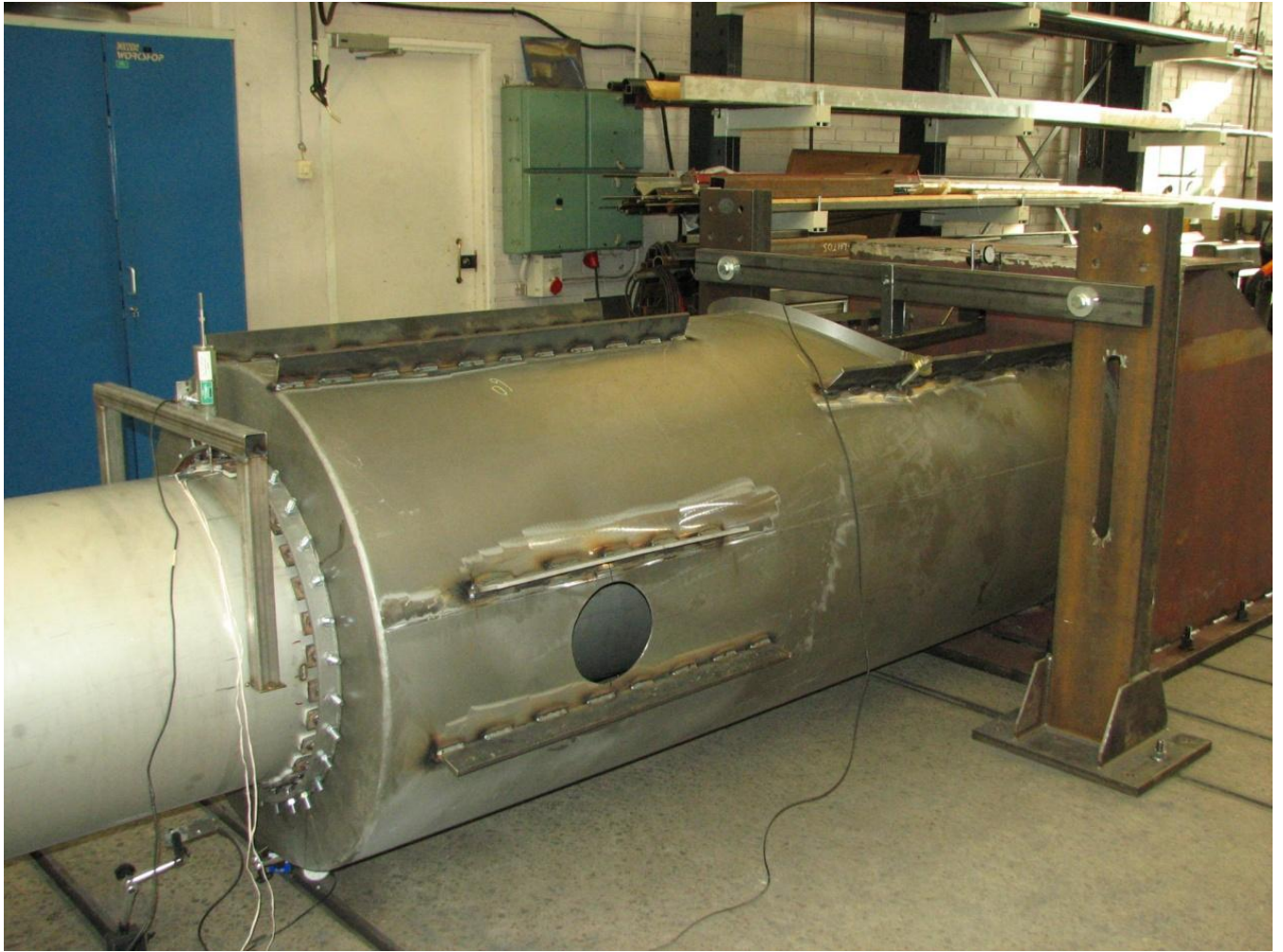
l_2 = Tukikonsolin pystylevyn korkeus

5.1 Testi 1

Ensimmäinen testi suoritettiin LUT Metallin teräsrakennelaboratoriossa 15.4.2011. Testaus eteni aluksi hyvin ja rakenteen siirtymät käyttäytyivät rakenteen elastisella alueella lineaarisesti. Kuitenkin 46 kN:in kuormituksella havaittiin, että rakenteen tukisylinterin kuori alkoi lommahtaa ja testi keskeytettiin. Lomahdusmuoto on esitetty kuvassa 15. Kuvassa 16 on esitetty tukisylinteriin hitsatut pitkittäisjäykisteet, joilla pyrittiin estämään tukisylinterin lomahdusta. Kuori jäykistettiin, koska testauksessa haluttiin ensisijaisesti tietoa sisemmän putken kuormitettavuudesta.



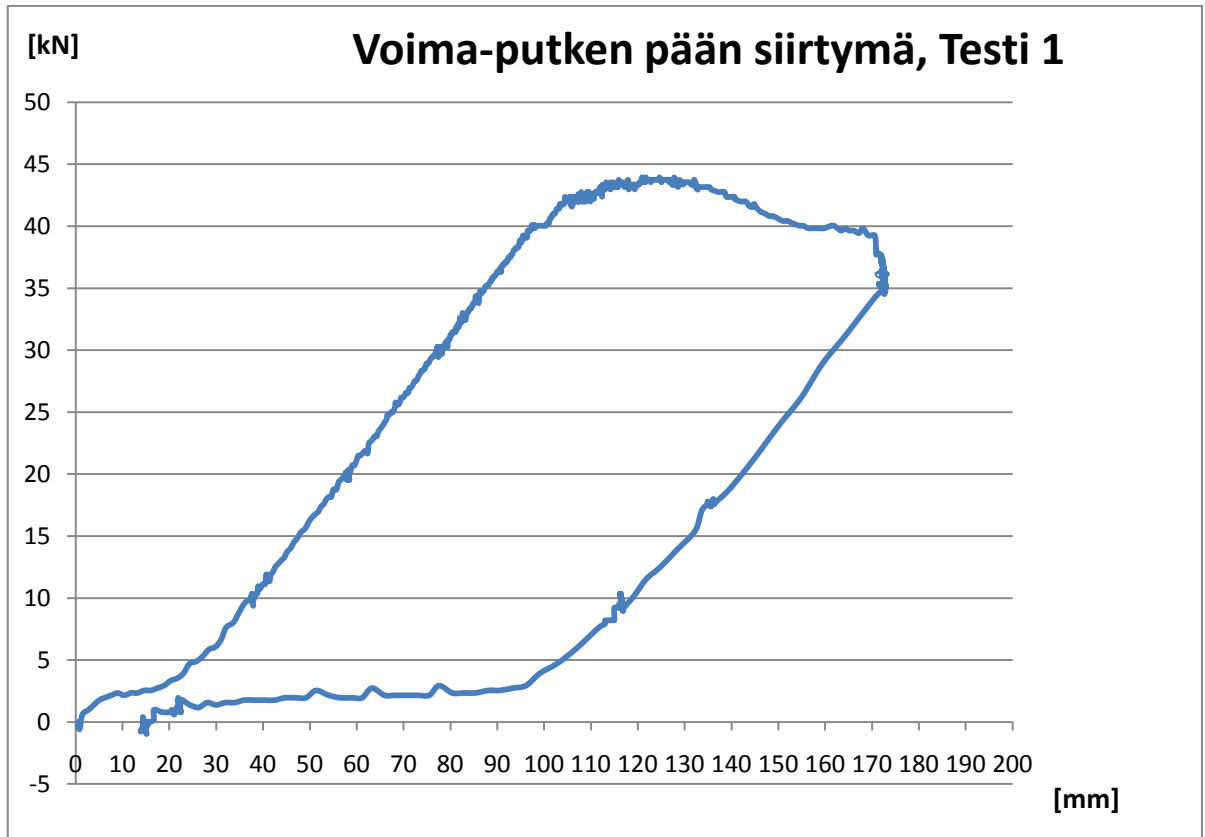
Kuva 15. Ensimmäisessä testissä leikkauslommahtanut tukisylinteri



Kuva 16. Tukisylinterin pitkittäisjäkisteet

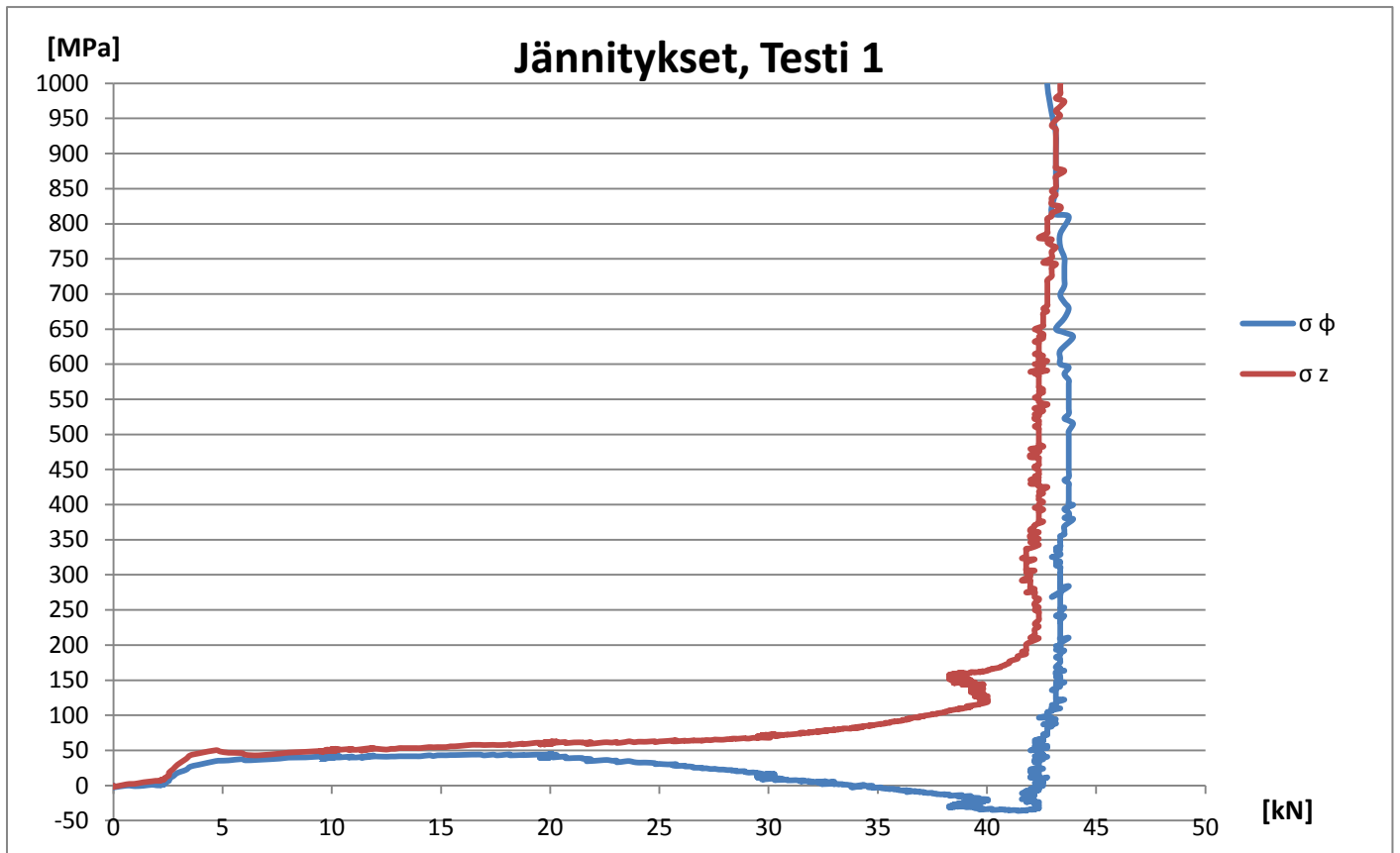
Pitkittäisjäkisteiden asentamisen jälkeen seuraava testi suoritettiin 20.4.2011. Tässä testissä putken myötääminen alkoi jo n. 40 kN:in kuormituksella, kunnes 43,8 kN:in kuormituksella rakenne menetti stabiiliutensa.

Kuvassa 17 esitetty voima – siirtymä kuvaajassa on alkupäässä havaittavissa, että siirtymä kasvaa ensimmäiset 30 mm ilman merkittävää kuormitusta. Tämä johtunee liukupalojen löysästä kiristyksestä, sekä niissä olevan muovin kokoonpuristumisesta, sillä vastaavaa ilmiötä ei enää toisessa testissä havaittu.



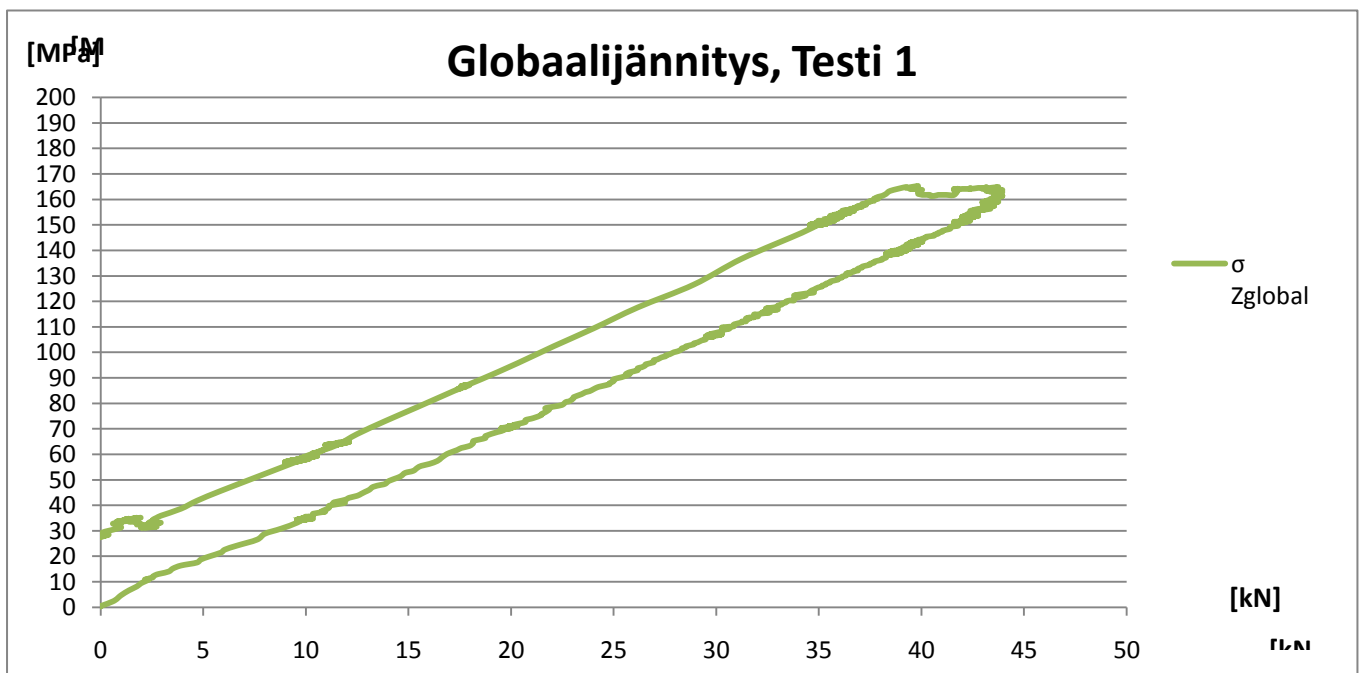
Kuva 17. Voima – Putken pään siirtymä, Testi 1

XY- venymäliuskalla mitatut jännitystulokset osoittautuivat hieman ennako-odotuksista poikkeaviksi, sillä putken päältä liukupalojen välistä mitatut meridiaani- ja tangentialijännitykset olivat vetoa puristuksen sijaan. Tämä johtunee siitä, että juuri venymäliuskan kohdalla rakenteessa syntyy paikallisia muodonmuutoksia. Kun kuori pullistuu liukupalojen välissä, näkyy se poissonin efektin vaikutuksesta vetojännityksenä. Ilmiön tarkempi analysointi vaatii rakenteen epälineaarista FE-analyysia. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Meridiaani- ja tangentiaalijännitykset, Testi 1

Kuvassa 19 on esitetty putken alapinnasta mitattu globaali vertailujännitys, joka käyttäytyi oletetun lineaarisesti sekä kuormituksen, että kuorman poiston aikana.



Kuva 19. Globaalijännitys, Testi 1

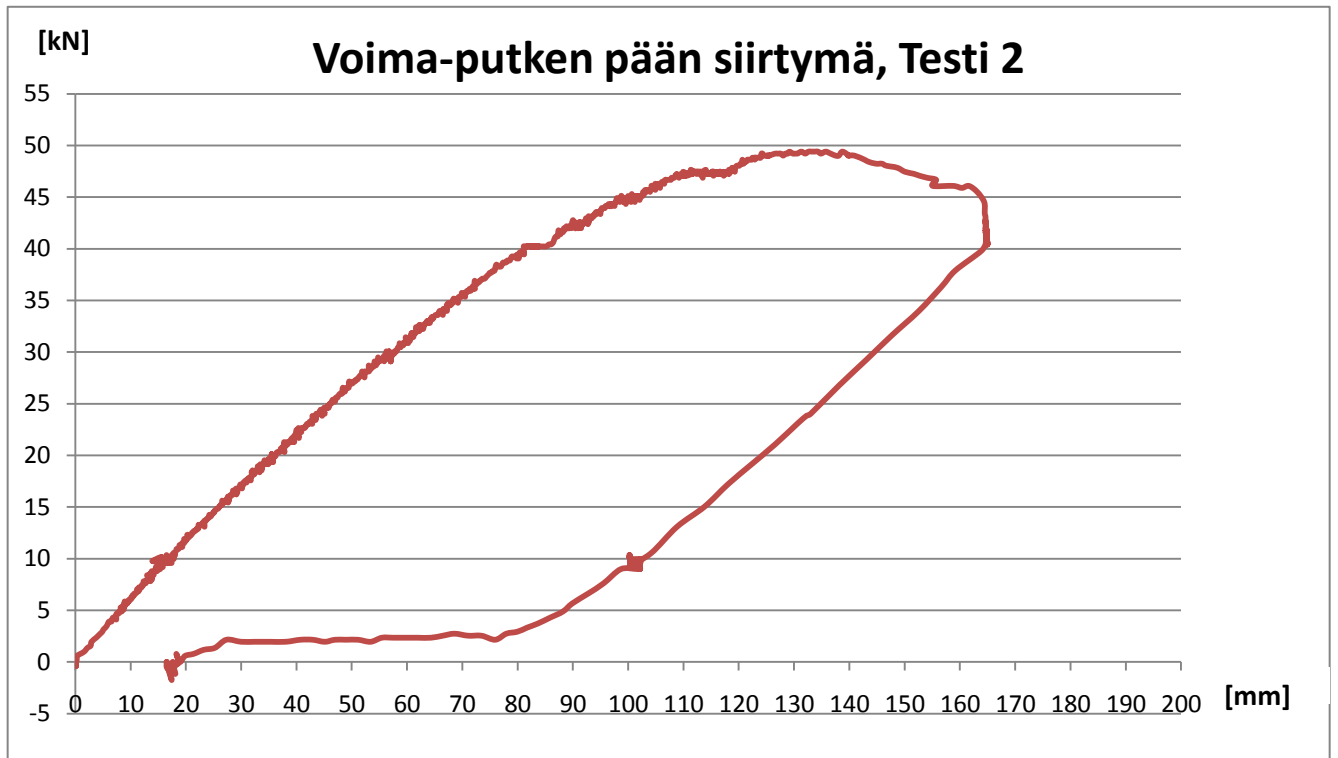
5.2 Testi 2

Putken toinen pää testattiin 27.4.2011. Testi pyrittiin suorittamaan mahdollisimman tarkasti samalla tavalla kuin ensimmäinenkin testaus. Eroavaisuutena mainittakoon kuitenkin, että ensimmäisessä testauksessa vaurioituneita liukupaloja ei kunnostettu toista testausta varten. Kriittisellä alueella putken yläpinnalle tulevista liukupaloista siis puuttui putkea vasten tuleva muovikappale. Vaurioituneet tukipalat näkyvät kuvassa 20.

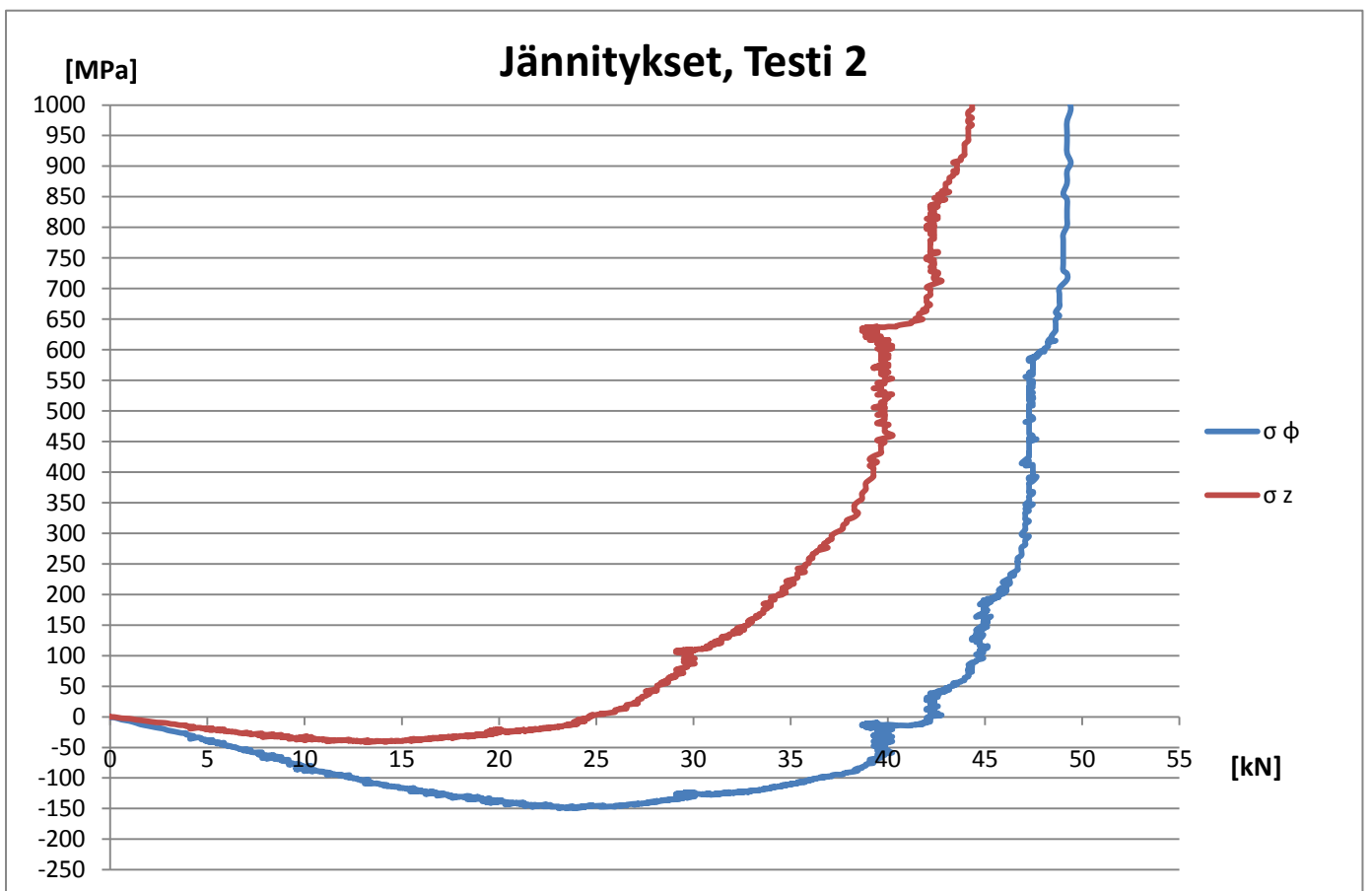


Kuva 20. Yläreunan tukipalat ilman muovikappaleita testissä 2

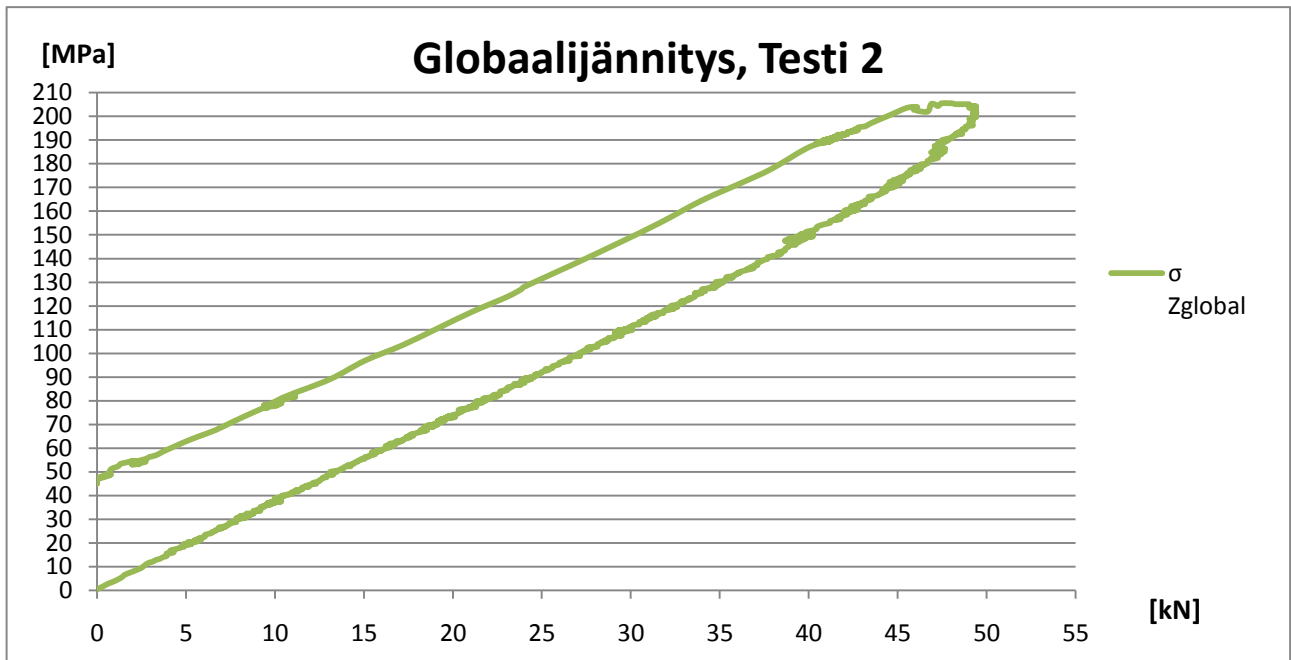
Toisessa testissä putken elastinen käyttäytyminen jatkui hieman suurempaan kuormitukseen saakka ja myötääminen alkoi n. 46 kN:in kuormituksella. Lopulta rakenne menetti kantokykynsä 49,5 kN:in kuormituksella. Kuvassa 21 on esitetty putken pään voima – siirtymä kuvaaja ja kuvassa 22 voima – jännitys kuvaaja. Syntyneet globaalijännitykset on esitetty kuvassa 23.



Kuva 21. Voima – Putken pään siirtymä, Testi 2



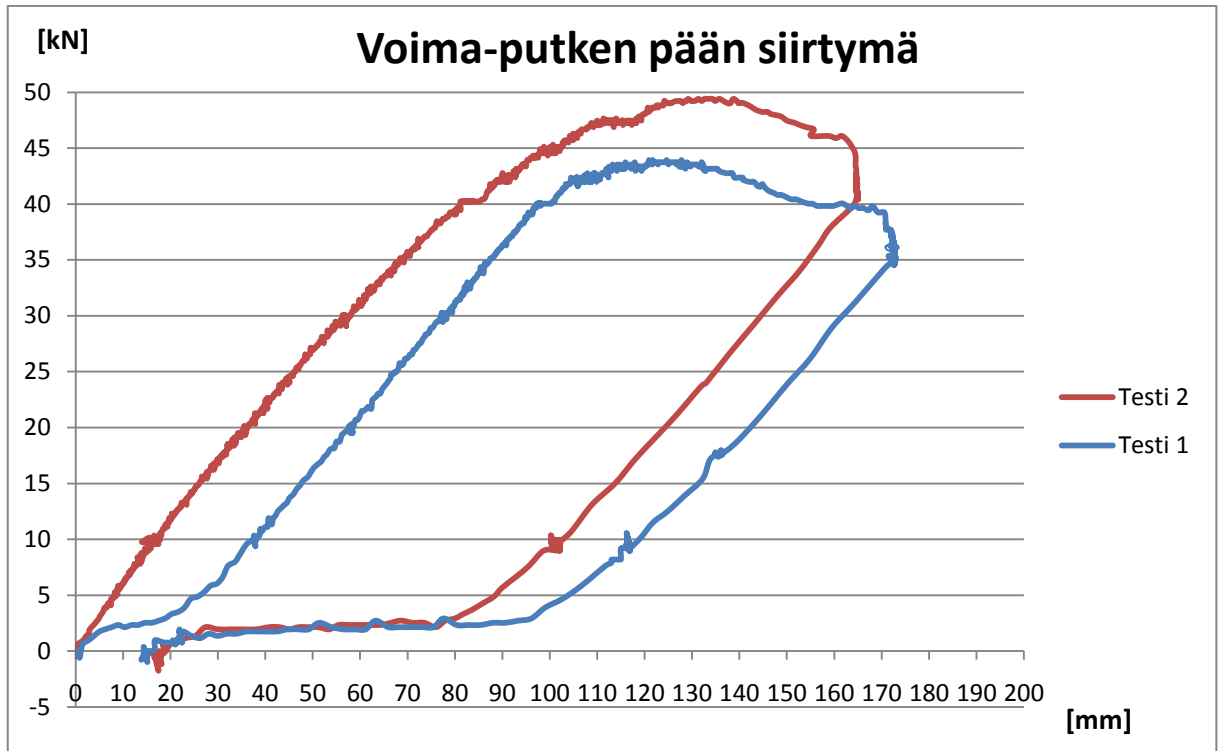
Kuva 22. Meridiaani- ja tangetiaalijännitykset, Testi 2



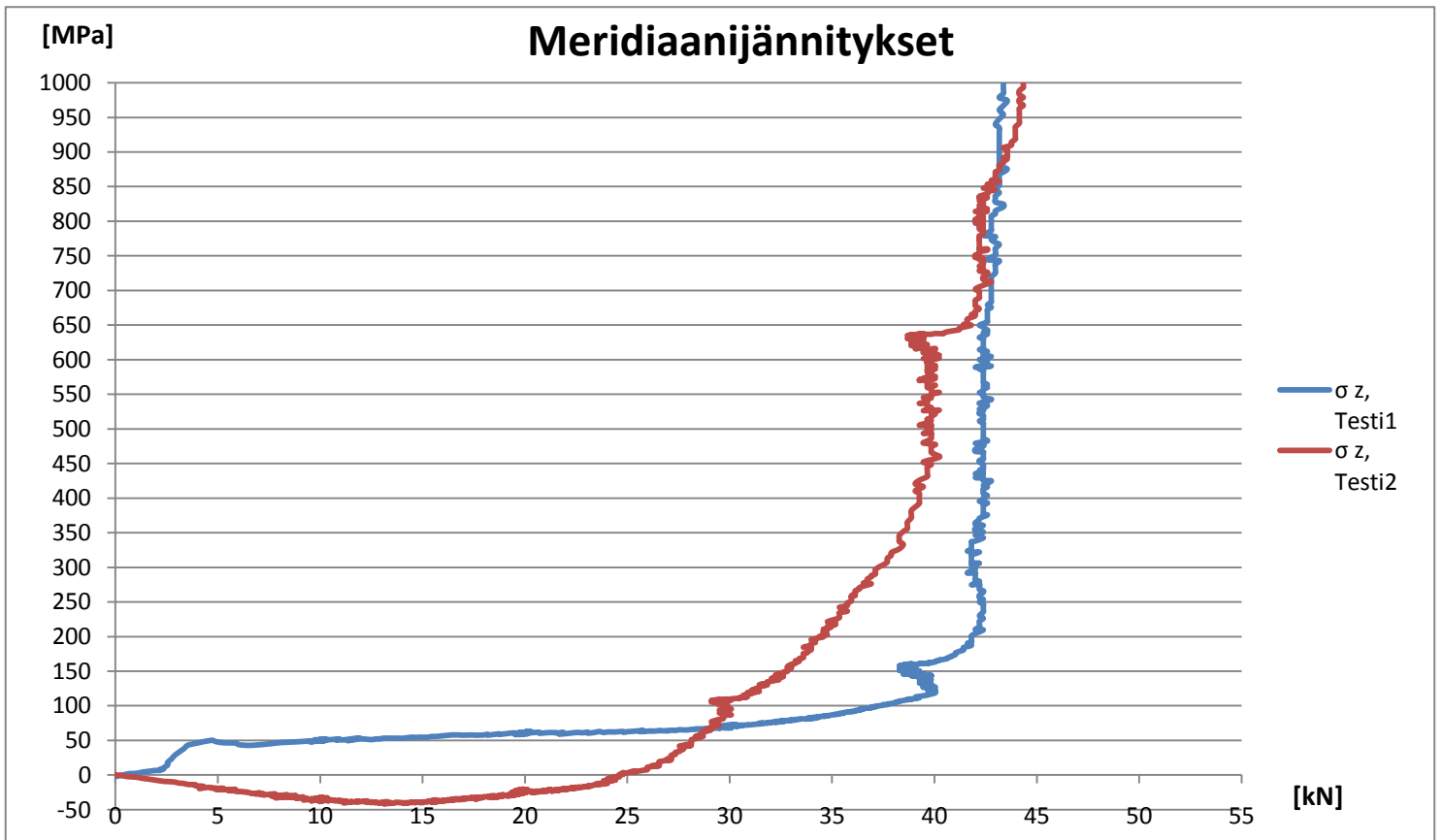
Kuva 23. Globaalijännitys, Testi 2

5.3 Testien vertailu

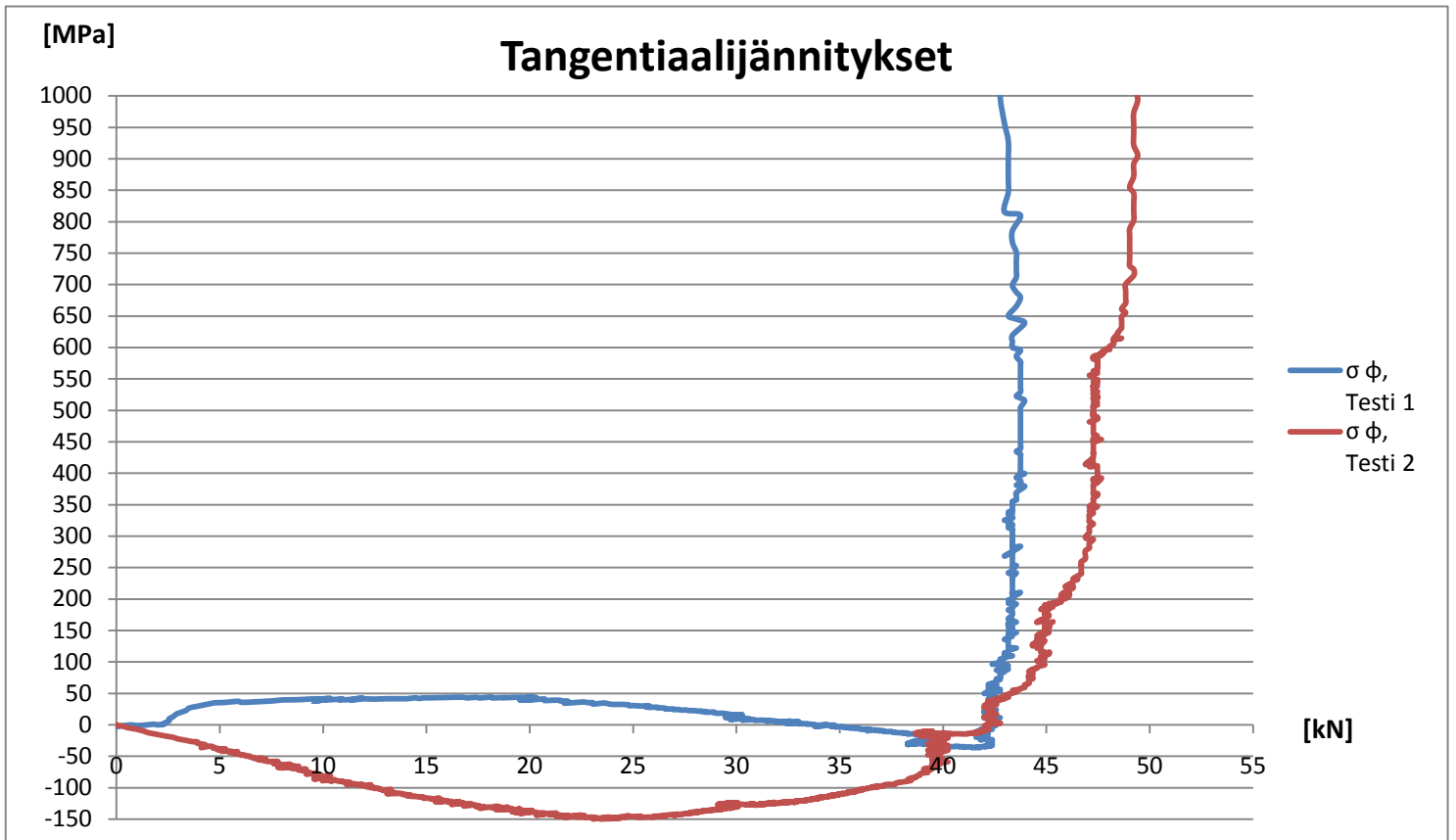
Kuvissa 24-28 on vertailtu saatuja tuloksia testeittäin ja voidaankin sanoa, että testeistä saadut tulokset ovat pääasiallisesti hyvin samansuuntaiset. Luonnollisesti putken toisen pään suurempi kuormitettavuus tarkoittaa hieman suurempia venymien ja jännitysten arvoja. Tukipalojen välistä mitatuissa jännityksissä havaittu ero johtunee eroista lommonmuodostumisessa, joka on hyvin paikallinen ja vaikeasti ennakoitavissa oleva ilmiö. Kuitenkin nämäkin jännitykset olivat kokonaisuutena ajatellen samaa suurusluokkaa ja testauksen tuloksia voidaan pitää luotettavina



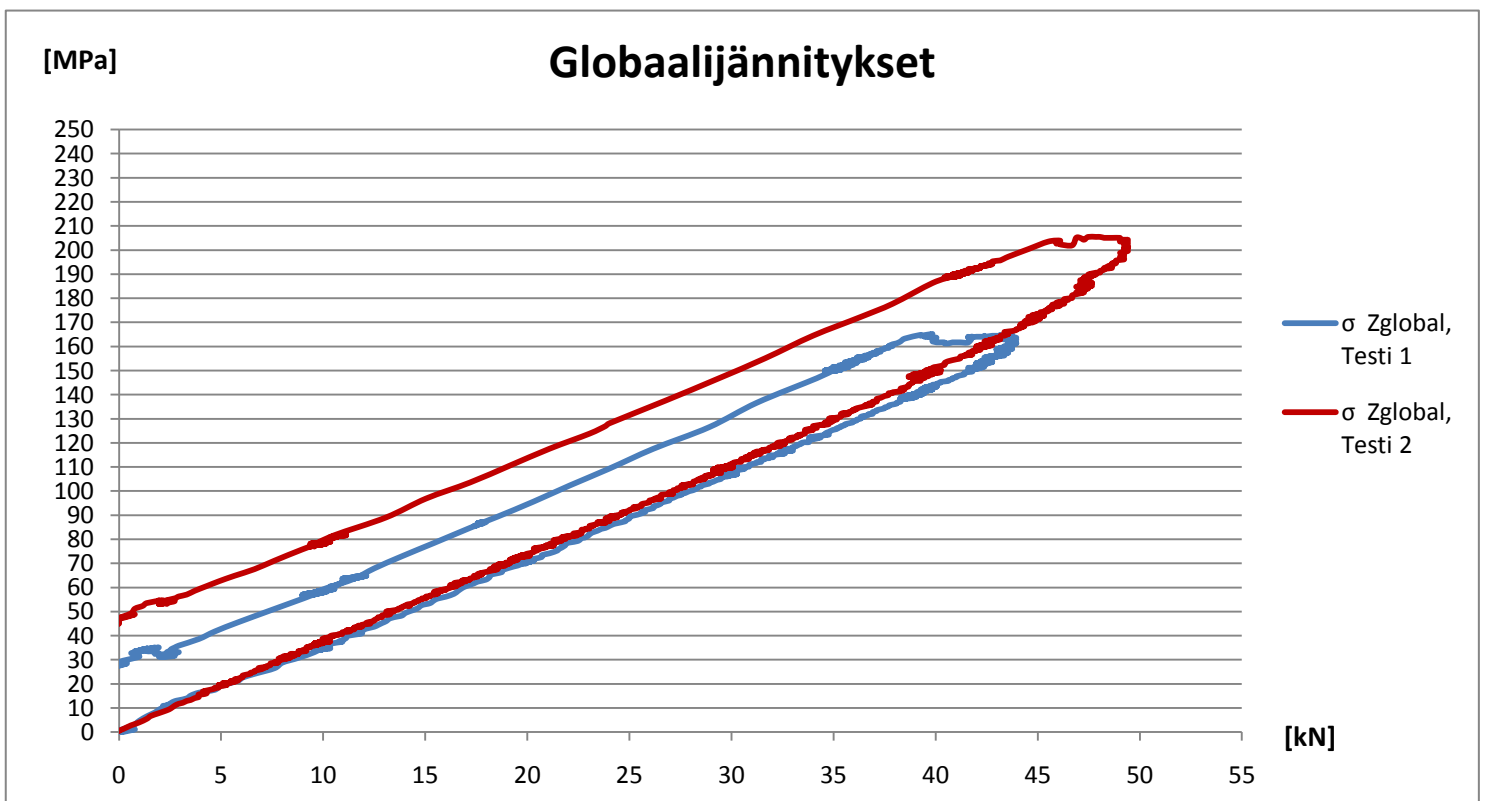
Kuva 24. Putken pään siirtymä testeittäin



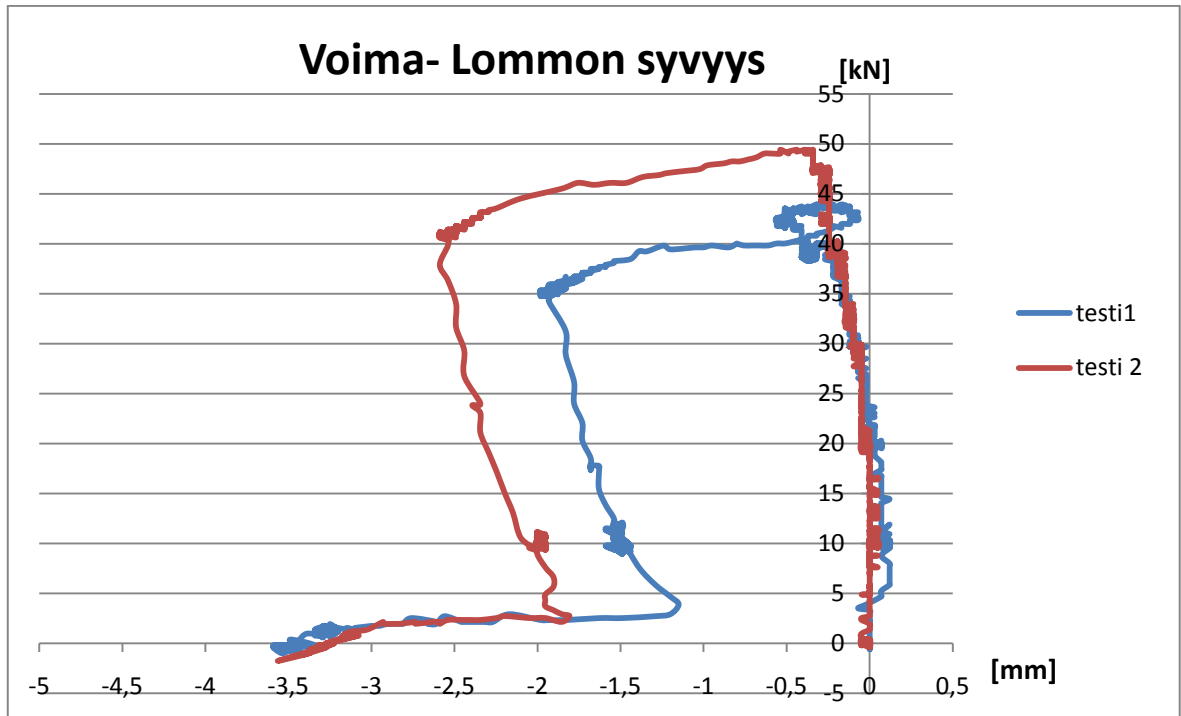
Kuva 25. Ylemmän tuen meridiaanijännitykset testeittäin



Kuva 26. Ylemmän tuen tangentiaalijännitykset testeittäin



Kuva 27. Rakenteen globaalijännitykset testeittäin



Kuva 28. Tuen kohdalle syntyvän lommon syvyys testeittäin

6 JATKOTUTKIMUSAIHEET

Tässä työssä analyttiseen tarkasteluun käytetty Eurocode 3:n mukainen laskentamalli ei ota huomioon rakenteen ylätuen tukireaktion aiheuttaman radiaalisuuntaisen painauman ja taivutusmomentin aiheuttaman meridiaanisuuntaisen puristusjännityksen interaktiota.

Tämän lommahduksen kannalta erittäin kriittisen kuormitusyhdistelmän selvittämiseksi tulisi rakenteesta laatia epälineaarinen FE-laskentamalli ja tutkia sen käyttäytymistä.

Tällä menetelmällä voitaisiin tarkemmin myös analysoida ylimmän tuen kohdalle syntyvien lommojen geometrian paikallista vaikutusta koko rakenteen kuormituskapasiteettiin.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Empiiriset kokeet varmistivat selkeästi analyttisten laskelmien perusteella tehdyn oletuksen siitä, että rakenteen kriittisin kohta tulee olemaan putken ylimmän tuen kohdalla. Rakenne vaurioitui tukirakenteen jäykistämisen jälkeen, lähes täysin oletetulla tavalla. Tukien kohdalta lommahtamalla.

Vaikka analyttisessä laskennassa jouduttiin tekemään muutamia yksinkertaistuksia, osoittivat empiiriset kokeet kuitenkin niiden olevan melko tarkkoja. Analyttinen kestävyysarvio poikkesi ensimmäisen testin tuloksesta n. 7 kN ja toisen vain 1,2 kN.

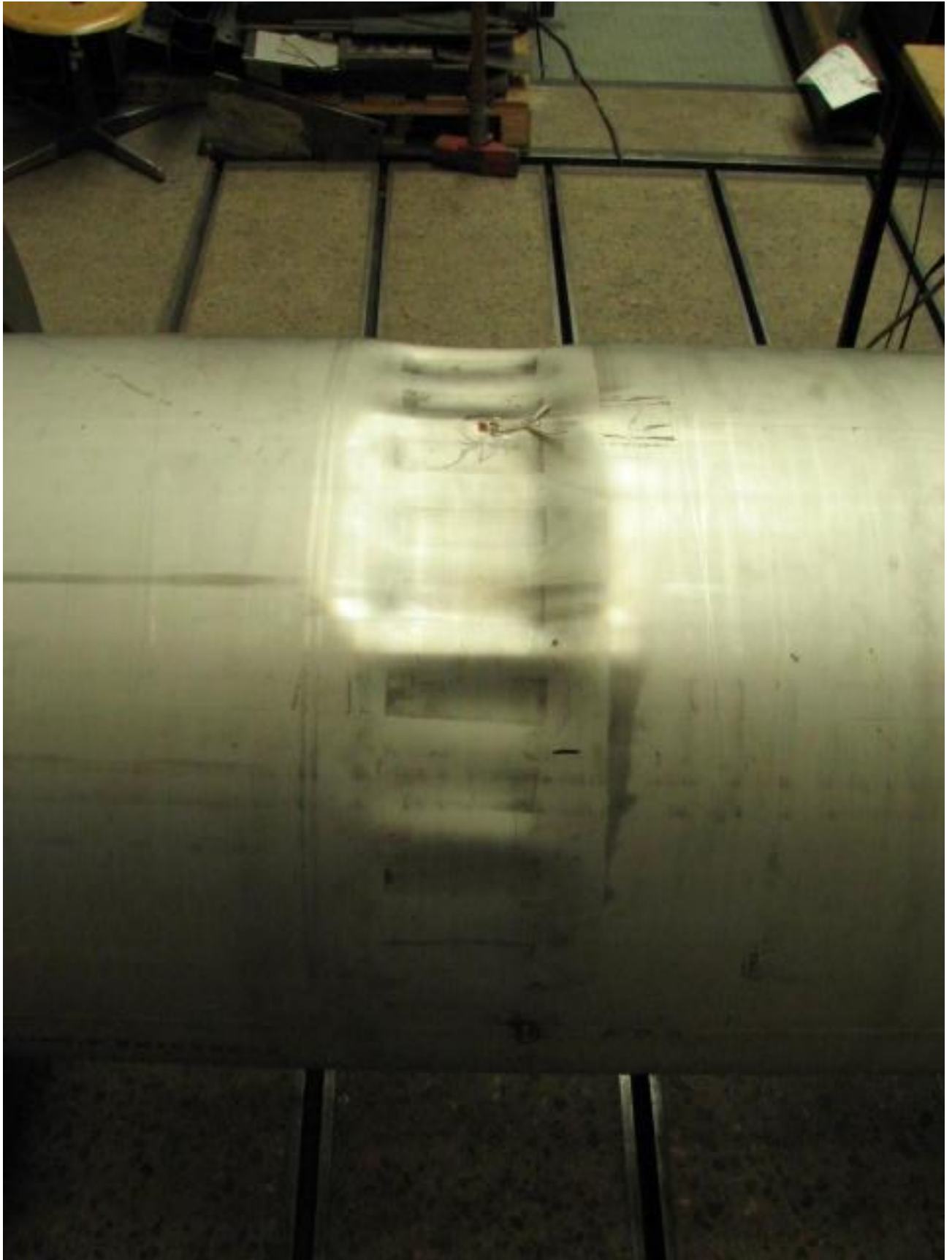
Rakenteen äärikestävyytenä voidaan pitää tulosten keskiarvoa, joka on n. 46,70 kN. Molemmissa tapauksissa lommahdushetkellä ylätuen kohdalle syntyy paikallinen, lähes murtorajan suuruinen jännitys, joka johtaa rakenteen stabiiliuden menetykseen. Kuormitus synnytti molemmissa testeissä keskimmäisten tukipalojen kohdalle n. 3,5 mm syvän lommon. Murtokuormitusta vastaava putken pään siirtymä on suurimmillaan luokkaa 175 mm.

LÄHTEET

SFS-EN 1993-1-6. 2007. Eurocode 3 Teräsrakenteiden suunnittelu: Osa 1-6. Kuorirakenteiden lujuus ja stabiilius. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 94s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

EN 1993-1-4. 2006. Eurocode 3 Teräsrakenteiden suunnittelu: Osa 1-4. Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. 37 s.

LIITE 1 Ensimmäisen testin lommahdusmuoto



LIITE 2 Toisen testin lommahdusmuoto



LIITE 3 Ensimmäisen testin mittauspöytäkirja

runkorakenteen pienoismallin testi 1 Sathe pv 20.4.2011

CH0 – Voima	=1v-40kN	anturi interface 1032AF – 225kN-B	Suntti:60kOhm-155,31kN-3,883v
CH1 – Siirtymä 1	=1v-20mm	anturi HBM W100K	Suunta= ↑-
CH2 – Siirtymä 2	=1v-10mm	anturi Kyowa DT-50	Suunta= ↑+
CH3 – Siirtymä 3	=1v-4mm	anturi Kyowa DT-20D	Suunta= ↑-
CH4 – Siirtymä 4	=1v-10mm	anturi Ultra-ääni PIL	Suunta= ↑+
CH5 – Siirtymä 5	=1v-4mm	anturi Kyowa DT-20D	Suunta= ↑+
CH6 – Liuska 1a	=1v-1000μ	anturi HBM 3/120XY91	K=1.97 Shuntti: <u>5000μsh - 12.063kΩ</u>
CH7 – Liuska 1b	=1v-1000μ	anturi HBM 3/120XY91	K=1.97 Shuntti: <u>5000μsh - 12.063kΩ</u>
CH8 – Liuska 2	=1v-400μ	anturi HBM 3/120LY41	K=2.04 Shuntti: <u>2000μsh - 29.292kΩ</u>

Mittakone: 820-1267

Tiedostonimi: TT_TEST1b.TXT

Mittausaloitettu: 9.45

Sattho hae Testi Tille

S1. lähtö +72.9mm

9.46 Poistuvapaa

9.47 10kN ~~10~~

9.50 0kN konsolikellon asetus 4.00mm

9.54 10kN ≈ 38mm

9.56 20kN ≈ 53mm

10.00 30kN ≈ 79mm

10.05 40kN ≈ 91mm, isku pois, pivoima ruuvivareen

10.12 - - kokon iatko

10.16 42.5kN ≈ 108mm

10.20 ~~45~~kN 43.5kN 2ta alueen vaihto 10 → 100

10.24 40kN 1ta y'i alueen, siirtymä S1 y'i alueen

F_{max} = 43.8kN putki romahti

10.44 voima 0kN

LIITE 4 Toisen testin mittauspöytäkirja

runkorakenteen pienoismallin testi 2

pv 27.4.2011

CH0 - Voima	=1v-40kN	anturi interface 1032AF - 225kN-B	Suntti:60kOhm-155,31kN-3,883v
CH1 - Siirtymä 1	=1v-20mm	anturi HBM W100K	Suunta= $\uparrow -$
CH2 - Siirtymä 2	=1v-10mm	anturi Kyowa DT-50	Suunta= $\uparrow +$
CH3 - Siirtymä 3	=1v-4mm	anturi Kyowa DT-20D	Suunta= $\uparrow -$
CH4 - Siirtymä 4	=1v-10mm	anturi Ultra-ääni PIL	Suunta= $\uparrow +$
CH5 - Siirtymä 5	=1v-4mm	anturi Kyowa DT-20D	Suunta= $\uparrow +$
CH6 - Liuska 1a	=1v-	anturi HBM 3/120XY91	K=1.97 Shuntti: <u>5000μoh - 12.063 kΩ</u>
CH7 - Liuska 1b	=1v-	anturi HBM 3/120XY91	K=1.97 Shuntti: <u>5000μoh - 12.063 kΩ</u>
CH8 - Liuska 2	=1v-	anturi HBM 3/120LY41	K=2.04 Shuntti: <u>2000μoh - 29.292 kΩ</u>

Mittakone: 820-1267

Tiedostonimi: TT_Testi2a.TXT

Mittausaloitettu: 12.14

S₁ lähtö 86.5mm
 melaanin kello 5.00mm

12.14 paa vapoana

12.18 10kN

12.24 20kN

12.29 30kN

12.35 40kN

12.45 42.5kN

12.48 44.7kN

12.49 45kN

12.52 47.5kN

F_{max} 49kN

12.57 kaalehi

13.08 voima 0kN

s₁ 7.4mm, s₁ siirto 6mm taaksepäin

s₁ 37.5mm

s₁ 59.5mm

s₁ 86.1mm, istun ajo alas

s₁ 94mm,

L_{1a} alueen vastus 10 → 100

s₁ 103.5mm

s₁ 117.5mm

L_{1a} i₁