

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Konetekniikan osasto

Kimi Forsberg

PUTKITELAN KUORIMUODONMUUTOSTEN MALLINNUS

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi opinnäytteenä diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 2.10.2006.

Valvoja: Professori Jukka Tuhkuri

Ohjaaja: TkL Jari Juhanko

TEKNILLINEN KORKEAKOULU DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Kimi Forsberg Työn nimi: Putkitelan kuorimuodonmuutosten mallinnus Päivämäärä: 2.10.2006	Sivumäärä: 79
Osasto: Konetekniikan osasto Professuuri: Kul-49 Lujuusoppi	
Työn valvoja: Professori Jukka Tuhkuri	
Työn ohjaaja: Tekniikan lisensiaatti Jari Juhanko	
<p>Paperikoneen putkitelosten pyörimisnopeuksien noustessa rakenteelliset virheet aiheuttavat teloissa tärinää ja paperin laatuvaihteluita. Tärinästä johtuvat ongelmat rajoittavat tuotantonopeuden kasvattamista. Telojen seinämänpaksuusvaihtelu aiheuttavat kuorimuodonmuutoksia, jotka näkyvät telan pinnan heittoina. Esimerkiksi teräpäällistyksessä heitto aiheuttaa paperin päällystyksen määrän vaihtelua. Paperikoneen telosten kuorimuodonmuutoksia käsitteleviä tutkimustuloksia on esitetty kirjallisuudessa varsin vähän.</p> <p>Tutkimuksessa tehtiin ohjelma putkitelan kuorimuodonmuutosten mallintamiseen. Ohjelma verifioitiin elementtimenetelmään (FE) perustuvalla mallilla vertaamalla Elmer-ohjelmistolla laskettuja tuloksia Abaqus-ohjelmistolla laskettuihin tuloksiin. Lopuksi koetelasta tehtiin malli ultraäänimittauksista saadun seinämänpaksuusmatriisin perusteella.</p> <p>Mallin tarkkuutta parannettiin valitsemalla sopivat elementit ja riittävän tiheä elementtiverkko. Mallitetun koetelan siirtymien itseisarvon maksimiarvo pyörimisnopeudella 1600 m/min oli noin 0,124 mm ja suurin telan poikkileikkauksen geometriavirhe oli noin 0,196 mm. Mahdolliset tuloksiin vaikuttavat virheet pyrittiin löytämään verifiointivaiheessa.</p> <p>Ohjelma ottaa mittausmatriisista telan paksuustiedot ja määrittää mallin solmupisteiden koordinaatit Lagrangen kantafunktioiden avulla. Ohjelma tekee Elmer-ohjelmistoa varten elementti-, solmu-, reunaehto- ja otsikkotiedostot.</p> <p>Työn tuloksena on syntynyt verifioitu ohjelma, jolla voidaan tehdä elementtimalli seinämänpaksuusmittauksen perusteella. Tilavuusmallin avulla kuorimuodonmuutoksia voidaan tutkia ja ennaltaehkäistä jo telosten valmistusvaiheessa toleranssien määrittämisessä.</p>	
Avainsanat: kuorimuodonmuutos, putkitela, FE-mallinnus.	

Author: Kimi Forsberg

Title of the thesis: Modelling of the Shell Deformations of the Tube Roll

Date: 2 October 2006

Number of pages: 79

Department: Department of Mechanical Engineering

Professorship: Kul-49 Mechanics of Materials

Supervisor: Professor Jukka Tuhkuri

Instructor: Jari Juhanko, Lic. Sc. (Tech.)

Structural defects of the high speed tube roll create mechanical vibrations and thus variations in the quality of paper produced. Mechanical vibrations cause problems which reduces production efficiency. Variations in thickness of the tube roller's wall cause shell deformations which decrease the quality of the paper produced. For example in blade coating run out causes coating grammage variation. In literature there are only few studies about shell deformations of rotating cylinders like paper machine tube rolls.

A program was made to simulate shell deformations of tube roll. The program was verified with finite element (FE) model by comparing results calculated with the Elmer FE software to results calculated with the Abaqus FE software. Finally a test roll was modelled and wall thickness matrix was used as input rate.

Accuracy of the model was optimized by selecting suitable elements and element mesh. Maximum absolute value of displacement was 0,124 mm and biggest geometric error of the cross-section was 0,196 mm when modelling the test roll at a rotation speed of 1600 m/min. The program was verified to find any bugs there might be.

The program selects wall thickness from the measured matrix and defines mesh coordinates based on Lagrange interpolation. The program writes element-, node-, boundary condition, and header files for the Elmer FE software.

As a result a verified program which can be used for finite element modelling based on measuring matrix was developed. Using the volume model, any shell deformations can be examined and subsequently avoided at the manufacturing stage.

Keywords: shell deformation, tube roll, FE-modelling.

Alkusanat

Tämä työ on tehty Teknillisen korkeakoulun Koneensuunnittelun laboratoriossa paperikoneet yksikössä. Haluan kiittää kaikkia työtovereitani, annoitte loistavat puitteet työn tekemiseen. Erityiskiitokseni haluan osoittaa Tieteen tietotekniikan keskus CSC:n Mikko Lylylle. Työni ohjelmointiosuus olisi ollut turhan haasteellinen ilman hänen tukeaan. Haluan kiittää TkL Jari Juhankoa työn ohjauksesta, DI Thomas Widmaieria käytännön testien avustamisesta sekä DI Jari Toivaa yhteistyöstä ja neuvoista. Lisäksi haluan kiittää professori Petri Kuosmasta mielenkiintoisesta aiheesta. Kokonaisuutena työ oli haastava ja mielenkiintoinen!

En voi kylliksi kiittää vanhempiani Askoa ja Kiiraa, jotka ovat olleet aina tukena ja turvana. Kodista olen saanut parhaan mahdollisen pohjan opiskeluideni lisäksi muulle elämälle. Kiitos myös ymmärryksestä ajoittaista ”ylivilkkauttani” kohtaan.

’Ollessaan vielä ihan pieni Kimi teki jo enemmän kuin aikaihmiset jaksoivat ymmärtää. Ja se on aika paljon. Esimerkiksi Einstein pystyi laatimaan vaikeasti ymmärrettäviä asioita vasta täysi-ikäisenä (vertaa suhteellinen teoria). Kimi oli siis jo lapsena pitemmällä kuin Einstein.

Myöhemmin heillä on kyllä ollut paljon yhteistä. Kun Einstein siitä vähitellen iän mukana kehittyi, niin hänkin rupesi Kimin tapaan keksimään sellaista, mitä eivät läheskään kaikki tajua. Mutta suurimmille neroillehan riittääkin, että vain fiksuimmat ymmärtävät.’ ”Huumorintaju on hyvyyden puntari”.

– Spede Pasasta vapaasti muotoiltuna –

Espoossa 21.7.2006

Kimi Forsberg

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Käytetyt merkinnät

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Tutkimuksen taustaa.....	9
1.2	Ongelma	9
1.3	Tavoitteet.....	10
1.4	Rajaukset	10
1.5	Tutkimuksen kulku.....	11
2	PUTKITELA	12
2.1	Telan valmistuksen dimensiotarkkuus	12
2.1.1	Telavaipan taivutus.....	13
2.1.2	Telavaipan hitsaus	15
2.1.3	Telan koneistus.....	17
2.3	Telavirheiden aiheuttamat dynaamiset ja staattiset ominaisuudet	18
2.3.1	Terminen taipuma.....	19
2.3.2	Ympyrämäisyys ja lieriömäisyys	19
2.3.3	Heitto ja kieppuminen	22
2.3.4	Kuorimuodonmuutos.....	23
2.3.5	Taivutusjäykkyysvaihtelu.....	24
2.4	Aikaisemmat mallinnukset.....	26
3	TUTKIMUSMENETELMÄT JA - LAITTEISTOT.....	27
3.1	Koekappale.....	27
3.2	Mallin verifiointi	28
3.3	FE-analyyseissä huomioon otettavia asioita.....	29
3.4	Mallinnusten yksinkertaistukset	30
3.5	Elementit	30
3.5.1	Levyt, laatat ja kuoret.....	30
3.5.2	Kolmidimensioiset elementit.....	31
3.5.3	Gaussin integrointi	34
3.6	Ohjelman toimintaperiaate	35
3.7	Seinämänpaksuusmittaus.....	39
3.7.1	Ultraäänimittauksen periaate.....	39
3.7.2	Laitteisto	40

4	TULOKSET	42
4.1	Mallin ohjelmoiminen ja analysointi.....	42
4.2	Mallien verifiointi.....	46
4.2.1	Abaqus.....	46
4.2.2	Elmer	56
4.3	Seinämänpaksuus	60
4.4	Poikkileikkausten kuorimuodonmuutokset	63
5	TULOSTEN ARVOINTI	69
5.1	Verifiointi	69
5.2	Seinämänpaksuuden vaikutus.....	70
5.3	Kuorimuodonmuutokset.....	72
5.4	Virhetarkastelu	73
5.6	Ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi	74
6	YHTEENVETO	75
7	LÄHDELUETTELO	77

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

<u>Lyhenne</u>	<u>Selite</u>	
FE	Finite Element	
HAZ	Heat Affected Zone	

<u>Merkintä</u>	<u>Selite</u>	<u>Yksikkö</u>
r	säde, partikkelin etäisyys keskipisteestä	m, m
d	sylinterin ulkohalkaisija	m
L	telan pituus	m
H	telavaipan paksuus	m
$\Delta r_1, \Delta r_1$	ympyrämäisyyden tai lieriömäisyyden arvo	m
A_1, A_2	ympyrän tai lieriön ulkokehä	–
B_1, B_2	ympyrämäisyys	–
C_1, C_2	ympyrän tai lieriön keskipiste	–
Z_1, Z_2	lieriön akseli	–
S	massakeskipiste	–
G	kiekon mielivaltainen piste	–
e	epäkeskisen massan etäisyys pyörimiskeskistä	m
E	kimmomoduuli	Pa
I	jäyhyysmomentti	m ⁴
I_z	jäyhyysmomentti z-akselin suhteen	m ⁴
I_y	jäyhyysmomentti y-akselin suhteen	m ⁴
a	ellipsin isoakselin pituus	m
b	ellipsin pikkuakselin pituus	m
m	matriisin sarakkeiden määrä	–
n	matriisin rivien määrä, kierrostaajuus	–, 1/s
x	muuttuja, siirtymä x-suunnassa	–, m
y	muuttuja, siirtymä y-suunnassa	–, m
z	muuttuja, siirtymä z-suunnassa	–, m
t	muuttuja, siirtymä kehän suunnassa	–, m
φ	kiertymiskulma	°

ω	kulmanopeus	rad/s
N_x	elementtien määrä pituusakselin suunnassa	–
N_t	elementtien määrä kehän suunnassa	–
P_1, P_2, P_3, P_4	ultraäänilaitteen mittauspisteitä	–
$\phi_i(x_i)$	kantapolynomit pisteissä x_i	–
g	putoamiskiihtyvyys	m/s ²
ρ	tiheys	kg/m ³
O	keskuspiste	–
F_r	keskeisvoima	N
F_{vr}	tilavuusvoima säteen suunnassa	N/ m ³
V	tilavuus	m ³
L_u	koetelan ulkokehän pituus	m
π	pii	–
s	seinämänpaksuus	m
v	äänennopeus materiaalissa	m/s
T	etu- ja takaseinämän kaiun välinen kulkuaika	s
ξ	integroitipisteen koordinaatti	-
a_i	mielivaltainen vakio	-
b_i	yksikkövektori	-
B	vektori, joka koostuu yksikkövektoreista b_i	-
n	pyörimisakselin yksikkövektori	-
ω	kulmanopeusvektori	rad/s
x	materiaalin paikkavektori	m
x_0	piste pyörimisakselilla	m
y^i	pisteen koordinaatit	-
δW^A	virtuaalinen työ	Nm
ρ^0	mallin materiaalin tiheys	kg/m ³
V^0	mallin tilavuus	m ³
δx	virtuaalinen siirtymä	m

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

Paperikoneen telojen dynaamisen käyttäytymisen hallitseminen on tärkeä osa paperin valmistusta. Ajonopeuden ja paperin laatuvaatimusten kasvaessa telojen valmistustarkkuuteen ja mittatoleransseihin täytyy kiinnittää entistä enemmän huomiota.

Julkunen /9/ mainitsi väitöskirjassaan seuraavaa:

”Matemaattisten mallien avulla ei saada ideaalisesta telasta poikkeaville teloille tarkkoja tuloksia, sillä matemaattiset mallit edellyttävät tarkkoja geometriatietoja. Seinämän paksuuden mittaukseen ei ole tarjolla tarkkoja mittalaitteita ja mittauspisteiden lisääminen tekee mittauksen kohtuuttoman työlääksi. Matemaattisessa mallissa tela oletetaan palkiksi, vaikka telalla on myös kehän suuntaisia muodonmuutoksia”.

Nykyisten ultraäänilaitteiden avulla voidaan mitata erittäin tiheä matriisi telan seinämänpaksuusvaihtelusta. Haasteena on tämän mittausmatriisin käyttäminen mallin geometrian määrittämisessä. Telan vaipan mallintaminen tilavuuselementeillä mahdollistaisi kehän suuntaisten muodonmuutosten laskemisen. Tilavuuselementtejä käytettäessä haasteena ovat syntyvät suuret matriisit. Nykyiset laskentamenetelmät sekä tietokoneet ovat kuitenkin jo varsin tehokkaita ja pystyvät ratkomaan suuriakin malleja.

1.2 Ongelma

Vuonna 2006 paperiradan nopeudet ovat jopa yli 2000 m/min, jolloin paperi kulkee nopeudella 120 km/h. Nopeuksien noustessa telojen rakenteellisista virheistä johtuvat dynaamiset ongelmat korostuvat. Putkitelan dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat telan rakenne, jäykkyys ja massan jakautuminen telan vaipassa. Kun teloja ajetaan suurilla nopeuksilla, jo pienikin massan epätasainen jakautuminen vaikuttaa

dynaamiseen käyttäytymiseen. Telan pyörimiskeskion suhteen epäkeskeinen massan jakautuminen telan poikkileikkauksessa aiheuttaa muun muassa epätasapainoa ja kuorimuodonmuutoksia. Massan jakautuminen riippuu tasapainotusmassoista, laakeri-laakeri-linjan poikkeamisesta painopisteakselilta, epäjatkuvuuskohdista, kuten hitsisaumoista, sekä telavaipan seinämänpaksuusvaihteluista. /6/

Putkitela koostuu vaipasta, päätylaipoista ja päätyakseleista. Telavaipan massa on yli puolet telan massasta, joten vaipan seinämänpaksuusvaihtelu voi olla merkittävä telan dynaamisen epätasapainon aiheuttaja. Seinämänpaksuusvaihtelu aiheuttaa telavaipassa sekä taivutusjäykkyysvaihtelua että kehänsuuntaista jäykkyysvaihtelua. /1,6/

1.3 Tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on siirtää tutkimuksessa käytetyn koetelan mitatut geometriatiedot elementtimenetelmään (FE) perustuvaan verifioituun tilavuusmalliin, ja analysoida tämän koetelan seinämänpaksuusvaihteluista johtuvia kuorimuodonmuutoksia. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää vaipan paksuuden mitattaamista ultraäänilaitteella ja paksuustietojen käytettämistä telan FE-mallin geometrian määrittämisessä.

Haasteena on ultraäänilaitteen antamien mittaustulosten suodattaminen ja käsitteleminen sopivaksi FE-malliin syöttämistä varten. Tavoitteena on saada luotua ohjelma, jonka avulla mittaustulokset saadaan syötettyä FE-malliin mahdollisimman helposti.

Verifioitu FE-malli mahdollistaa telavaipan paksuusvaihteluiden dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavien ominaisuuksien tutkimisen.

1.4 Rajaukset

Työn teoreettinen tarkastelu rajataan kohdistumaan kuorimuodonmuutoksia aiheuttaviin ilmiöihin hitsatuissa teräksisissä putkiteloissa. Mallin verifioinnissa keskitytään tarkastelemaan tutkimuksessa käytetyn koetelan kuorimuodonmuutoksia.

Epätasapainoon ja siten telan taipumiseen liittyviä ilmiöitä ei tarkastella. Työn

tarkoituksena ei ole kehittää FE-menetelmän teoriaa.

1.5 Tutkimuksen kulku

Ensimmäisessä luvussa käydään läpi tutkimuksen taustaa ja tutkimukseen liittyviä ongelmia, tavoitteita sekä rajoituksia.

Luvussa 2 on esitelty kirjallisuustutkimus. Putkitelan valmistuksesta esitetään telan valmistuksen dimensiotarkkuutta ja rakenteellisten virheiden mittaamenetelmiä. Lisäksi on esitetty telavirheiden aiheuttamia dynaamisia ja staattisia ominaisuuksia. Myös aikaisemmin toteutetun samantyyppisen mallinnuksen perusteita käydään läpi.

Kolmas luku käsittelee tutkimusmenetelmiä ja -laitteistoja. Tutkimusmenetelmien selvityksessä on esitelty lähtökohdat FE-mallinnukselle ja mallien verifiointi. Tutkimuslaitteistojen esittely sisältää mittauslaitteiston lisäksi mittauksen periaatteen.

Tulokset on esitelty luvussa 4. Mallien verifiointi on suoritettu Abaqus- ja Elmer-laskentaohjelmilla. Elmer-ohjelmistolla on esitelty mallin poikkileikkausten muodonmuutokset eri nopeuksilla. Tulososiossa on esitelty myös ultraäänimittausten tulokset.

Tulosten arviointi on esitelty luvussa 5. Kappaleessa on arvioitu seinämäpaksuuden vaikutusta putkitelan dynaamiseen käyttäytymiseen. Kuorimuodonmuutoksia on analysoitu poikkileikkauskuvien ja muodonmuutosten itseisarvon avulla. Luvussa on analysoitu myös telan rakenteellisten virheiden vaikutusta mallinnustuloksiin.

Luvussa 6 on esitelty tutkimuksen yhteenveto.

2 PUTKITELA

Telojen dynaamiseen käyttäytymiseen liittyy useita eri ilmiöitä, kuten tasapaino, ominaistaajuus, vaimennus ja värähtelyt.

2.1 Telan valmistuksen dimensiotarkkuus

Telan pyöriessä kuorimuodonmuutoksia aiheuttavat muun muassa telan valmistuksessa syntyvät seinämänpaksuusvaihtelut.

Telalla on kolme toisistaan poikkeavaa olotilaa, jotka voidaan erotella lähteen /8/ mukaan:

- 1) Mittaustila, jossa tela on yleensä vapaasti tuettu ja hitaasti pyörivä roottori.
- 2) Työstötila, jossa tela on lievästi kuormitettu joustava roottori, johon dynamiikka vaikuttaa jonkun verran.
- 3) Käyttötilanne, jossa tela on dynaamisesti käyttäytyvä joustava roottori, johon vaikuttavat ulkoiset olosuhteet.

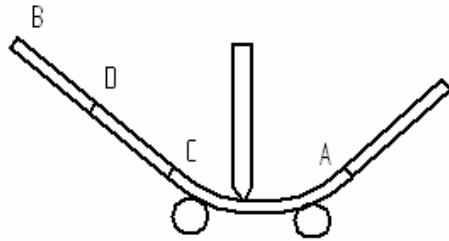
Kun telaa kuormitetaan valmistuksen yhteydessä (esim. sorvaus), tarkastellaan työstötilaa.

2.1.1 Telavaipan taivutus

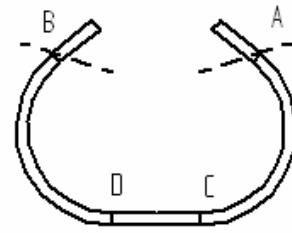
Putkitelan vaippa valmistetaan usein levystä hitsaamalla yhdestä tai useammasta osasta tai valamalla. Tutkimuksessa mallinnettavan koetelan vaippa on valmistettu kahdesta teräslevystä taivuttamalla särmäyspuristimella ja hitsaamalla.

Telavaipan putkiahion valmistuksen vaiheet näkyvät kuvassa 2.1.1–1. Ensimmäisessä vaiheessa levy taivutetaan kohdasta A kohtaan C ja kohdasta B kohtaan D. Vaiheessa 2 ahion päistä leikataan työvarat pois ja samalla tehdään hitsausviisteet. Vaiheissa 3 ja 4 ahion pohjan suora osa taivutetaan ja hitsataan juuripalko. Vaiheessa 5 tehdään ensin putkiahion hitsaussauman vastapuolelle hitsin mittainen vastakuumennus, jonka tarkoituksena on kompensoida hitsauksen aiheuttama käyristyminen. Vaiheessa 6 tela kalibroidaan. Tämän tarkoituksena on tasoittaa hitsauksesta aiheutuvia jäännösjännityksiä ja korjata muotovirheitä. /16/

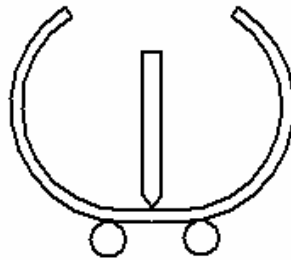
1. Alkutaivutus



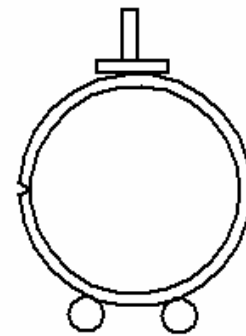
2. Työvarojen poisto



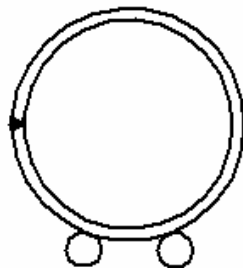
3. Pohjan taivutus



4. Juuren hitsaus



5. Vastakuumennus ja hitsaus



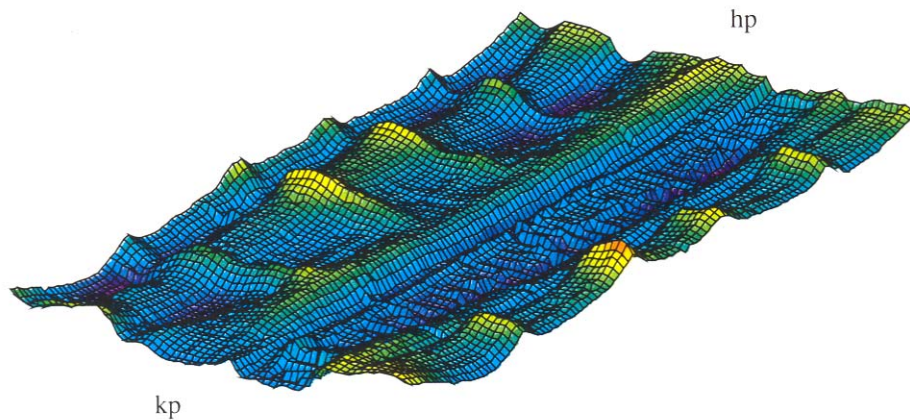
6. Kalibrointi



Kuva 2.1.1–1 Telavaipan putkiaihion valmistusvaiheet

Lähteessä /1/ esitetty erään telavaipan seinämäpaksuusvaihtelun levityskuva 2.1.1–2 havainnollistaa hyvin vaipan särmäyksessä syntyviä seinämäpaksuusvaihteluita. Kuvassa näkyy teräviä poikittaisia vyöhykkeitä, joissa seinämäpaksuus on suurempi kuin niiden viereisillä alueilla. Terävien seinämäpaksuusvaihteluiden on oletettu lähteen /1/ mukaan johtuvan juuri vaipan taivutuksesta. Särmäyspuristimien vastinrullat ovat olleet todennäköisesti tuettuna kuudesta kohdasta ja levy on taipunut erilailla tuentapisteiden väliltä kuin niiden kohdalta. Kun ulkopinta sorvataan

ympyrämäiseksi, jää tuentapisteiden kohdalle teräviä seinämäpaksuusvaihteluita.



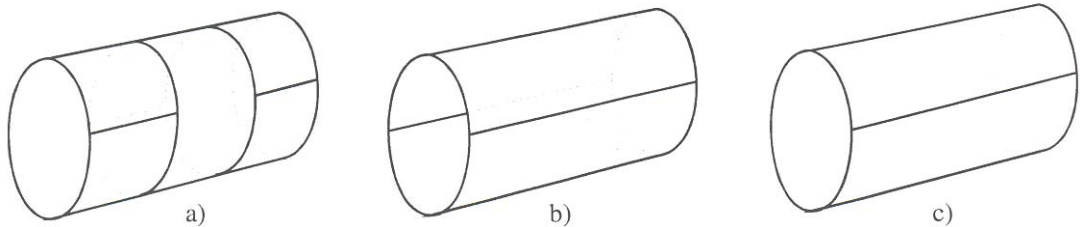
Kuva 2.1.1–2 Erään kunnostetun vastatelan telan telavaipan seinämäpaksuusvaihtelu levityskuvana. /1/.

Koetelan vaippaa ei ole sisäsorvattu joten seinämäpaksuusvaihtelut saattavat olla suuria. Seinämäpaksuusvaihtelut vaikuttavat telan dynaamiseen käyttäytymiseen. Tästä aiheutuvia ongelmia on selvitetty kappaleessa 2.3.

2.1.2 Telavaipan hitsaus

Hitsattuna levyrakenteena valmistettava putkitelan vaippa voidaan valmistaa joko yhdestä tai monesta osasta (kuva 2.1.2–1). Riippuu telavaipan materiaalista, pituudesta, halkaisijasta, seinämäpaksuudesta ja käytettävissä olevasta konekannasta, kuinka monesta osasta vaippa valmistetaan.

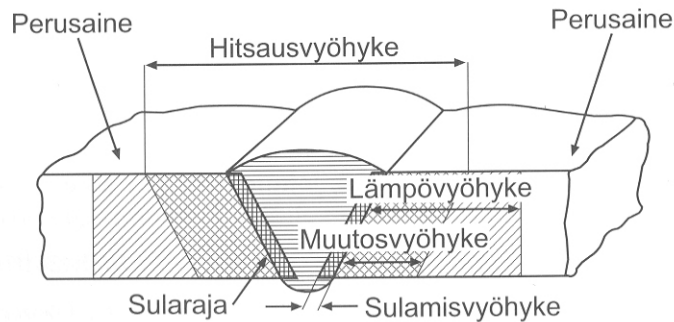
Nykyään useimmat putkitelat on valmistettu yhdestä osasta, jolloin niissä on yksi pituussuuntainen hitsisauma, kuten kuvassa 2.1.2–1 c. Suurimmat telat valmistetaan usein kuitenkin useammasta osasta.



Kuva 2.1.2–1. Vaihtoehtoisia rakennevaihtoehtoja levyrakenteen telavaipan aihionvalmistuksessa. /1/

Hitsattuna levyrakenteena valmistettu putkitela on useimmiten epäsymmetrinen, jolloin pääjäyhyedet ovat erisuuret. Tämä aiheuttaa muun muassa taivutusjäykkyysvaihteluita. Hitsausprosessissa liitospinnat sulavat, jolloin hitsausauman ympärille muodostuu materiaaliominaisuuksiltaan toisistaan eroavia vyöhykkeitä. Nämä vyöhykkeet näkyvät kuvassa 2.1.2–1 ja voidaan jakaa lähteen /7/ mukaan seuraavasti:

- hitsiaine: hitsauksen yhteydessä sulassa tilassa ollut aine
- sularaja: hitsiaineen ja sulamattoman perusaineen välillä oleva raja
- muutosvyöhyke (HAZ, Heat Affected Zone): se osa on perusainetta, johon hitsaus on aiheuttanut mikrorakennemuutoksia
- hitsausvyöhyke: hitsin ja muutosvyöhykkeen muodostama yhteinen vyöhyke
- sulamisvyöhyke: se osa perusainetta, joka on sulanut hitsauksen aikana
- lämpövyöhyke: se osa perusainetta, jonka lämpötila on ollut hitsauksen takia perusaineen lämpötilaa korkeampi. /14/



Kuva 2.1.2–1. Hitsausliitoksen muutosvyöhykkeet SFS 1996. /7/

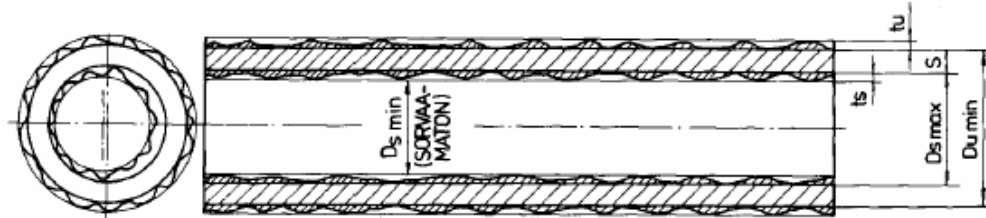
Käytännössä on ollut vaikea arvioida hitsisauman vaikutuksia telan dynaamisiin ominaisuuksiin. Telaa mallinnettaessa on mahdollista ottaa huomioon hitsisauman vaikutus asettamalla saumalle eri kimmokerroin kuin perusaineella. Tunkeuman syvyys vaikuttaa siihen, minkä kokoisena sauma kannattaa mallintaa. Ongelmana on kuitenkin arvioida, kuinka paljon hitsisaumassa tapahtuneet materiaalin mikrorakenteen muutokset vaikuttavat kimmokertoimeen hitsisauman ympärillä. Vaipan pituussuuntainen hitsisauma vaikuttaa todennäköisesti myös telavaipassa tapahtuviin kuorimuodonmuutoksiin /1/.

Telavaipan koneistuksen kannalta täytyy muistaa, että hitsauksen jälkeen aihioon voi jäädä jäännösjännityksiä, jotka voivat aiheuttaa telan käyritymistä telan koneistuksen yhteydessä. Jäännösjännityksiä pyritään poistamaan aihioden hehkutuksella.

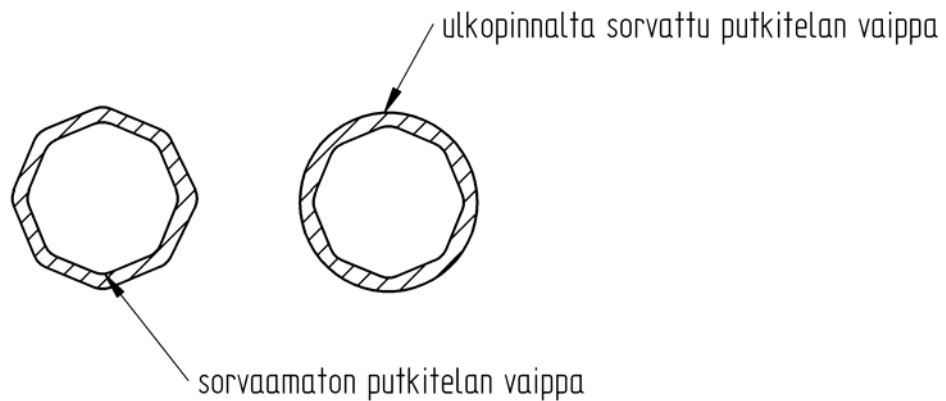
2.1.3 Telan koneistus

Telavaipan taivutuksen jälkeen telan poikkileikkausprofiili ei ole täysin ympyrämäinen. Telavaipan seinämäpaksuusvaihtelu ja ympyrämäisyysvirhe saadaan teoriassa poistettua sorvaamalla vaippa-aihio sisä- ja ulkopinnasta. Sisäsorvaus on kuitenkin valmistusteknisesti vaativa, kallis ja hidas valmistusvaihe. Jos sisäsorvaus jätetään pois, syntyy telavaippaan seinämäpaksuusvaihteluita kuvan 2.1.3–2 mukaisesti, kun vaipan ulkopinta sorvataan ympyrämäiseksi. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että sisäsorvaus voidaan jättää pois tietyin edellytyksin, jos vaipan geometria tiedetään jo valmistusvaiheessa. /4/

Seinämäpaksuusvaihtelun lisäksi telavaippa on epätasainen pituussuunnassa. Kuvassa 2.1.3–1 näkyy periaate telavaipan ulko- ja sisäpuolen pinnanmuodoista ennen vaipan sorvausta.



Kuva 2.1.3–1. Kaaviollinen kuva putkiaihiön vaipan epätasaisuuksista. /4,14/



Kuva 2.1.3–2. Vaipan kahdeksankulmaisuudesta aiheutuva seinämäpaksuusvaihtelu ulkopinnan sorvauksessa.

Kuorimuodonmuutosten kannalta oleellista ovat sisäreiän alimmat aaltomuodot, kuten soikeus ja kolmiomaisuus. Näillä aaltomodoilla massan epätasainen jakautuminen kehän suunnassa on suurinta.

2.3 Telavirheiden aiheuttamat dynaamiset ja staattiset ominaisuudet

Telojen dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavat useat eri tekijät, kuten tuenta, ympäristöolosuhteet ja telavirheet.

Telavirheet syntyvät useimmiten telan valmistusvaiheessa. Telavirheiden aiheuttamat

dynaamiset ja staattiset ominaisuudet ovat usein ongelmallisia telan dynaamisen tasapainon ja kuorimuodonmuutosten suhteen.

2.3.1 Terminen taipuma

Epätasainen lämpötilajakauma aiheuttaa lämpölaajenemisen seurauksena telan taipumista. Teräs pitenee noin $10 \mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$, jolloin telan toispuoleisesta jäähtymisestä aiheutuva taipuma voi olla millimetrin suuruusluokkaa. Jos tela sorvataan epätasaisen lämpötilajakauman vallitessa suoraksi, taipuu tela vastaavasti lämpötilajakauman tasoittuessa. Ennen koneistuksen aloittamista onkin ehdottoman tärkeää, että tela on tasalämpöinen. /6/

Terminen alkutaipuma syntyy esimerkiksi seuraavista syistä:

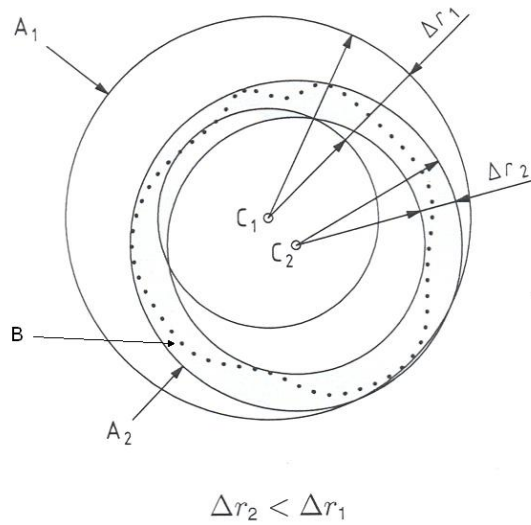
- lämmin tela jätetään jäähtymään paikoilleen tai
- kylmä tela tuodaan lämpimään halliin ilman, että sitä lämpenemisen aikana jatkuvasti pyöritetään.

Lisäksi toispuoleinen lämpötilajakauma voi syntyä koneistettaessa telaa, jossa on suuri ulkopinnan heitto. Toispuoleinen lämpötilajakauma aiheuttaa taipumaa, jos telaa ei pyöritetä jatkuvasti lämpötilajakauman tasaantuessa. /6/

2.3.2 Ympyrämäisyys ja lieriömäisyys

Ympyrämäisyys määritellään standardissa ISO 1101 /21/. Tarkasteltava poikkileikkausprofiili B (esim. telan poikkileikkaus) on piirretty kuvassa 2.3.2–1 pisteiviivalla ja vertailuympyrät yhtenäisillä viivoilla. Standardin mukaan piirretään kaksi samankeskeistä vertailuympyrää, joista toinen sivuaa tarkasteltavaa profiilia B sisäpuolelta ja toinen ulkopuolelta. Vertailuympyröiden keskipisteet ja säteet valitaan siten, että säteiden erotus on minimi ($\Delta r < r_1$). Tätä minimiarvoa kutsutaan ympyrämäisyydeksi.

Kuvan 2.3.2–1 mukaan oikea paikka kahdelle samankeskeiselle vertailuympyrälle on ympyrän A_2 keskipiste C_2 ja sitä vastaava pienin ympyrä, koska $\Delta r_2 < \Delta r_1$. Tällöin telan ympyrämäisyyden arvo on Δr_2 .

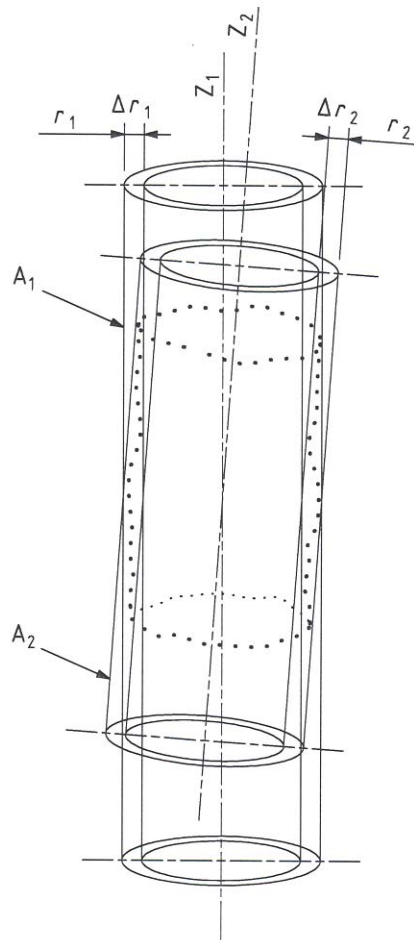


Kuva 2.3.2–1 Mahdollisia vaihtoehtoja vertailuympyröiden keskipisteiden paikoille ja ympyröiden säteiden minimille. /21/

Myös systemaattiset ja työkappaleen pyörimisen kanssa synkroniset virheet vaikuttavat telan ympyrämäisyysprofiiliin. Tällaisia virheliikkeitä syntyy muun muassa laakereiden soikeudesta. Jos telaa sorvataan omilla laakereillaan, joissa on epätarkkuutta, aiheuttaa se pyörimiskeskion liikettä suhteessa lastuavaan terään. Tämä liike kopioituu suoraan telavaipan ulkopinnan ympyrämäisyysvirheeseen. /6/

Ympyrämäisyys ei anna tietoa telan pituussuuntaisesta geometriasta, vaan siihen tarvitaan lieriömäisyyden määritelmää.

Lieriömäisyys on määritelty standardissa ISO 1101 /21/ seuraavasti: valitaan kaksi samanakselistä lieriötä, jotka sivuavat tarkasteltavaa lieriötä sisä- ja ulkopuolelta. Lieriöiden akselit asetetaan siten, että säteiden erotus on minimi.



Kuva 2.3.2-2 Mahdollisia vaihtoehtoja vertailulieriöiden akselien paikoille ja ympyröiden säteiden minimille. /21/

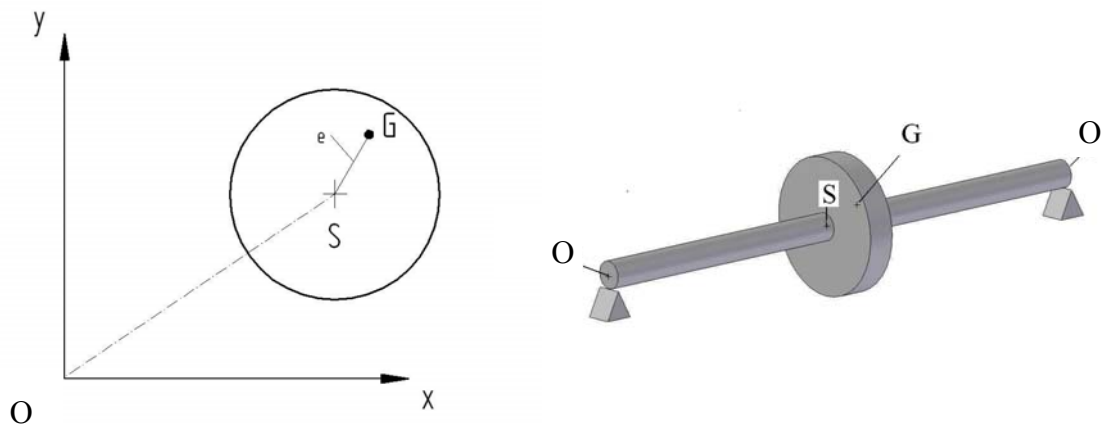
Kuvan 2.3.2-2 mukaan oikea lieriömäisyyden arvo saadaan lieriön A_2 mukaan, jolloin lieriömäisyyden arvo on Δr_2 .

2.3.3 Heitto ja kieppuminen

Telan heitto on pinnan säteen suuntaisen liikkeen arvo tarkasteltavassa suunnassa. Heiton arvo voidaan ilmoittaa usealla eri tavalla. Heiton telan pyörimiseen tahdistuvat komponentit ilmoitetaan usein amplitudeina.

Heittoon sisältyvät kaikki pinnan säteen suunnassa tapahtuvat pinnan liikkeet. Heittoa aiheuttaa massan epätasainen jakautuminen telan poikkileikkauksessa. Massan epätasaista jakautumista aiheuttavat seinämänpaksuusvaihtelut ja materiaalin epähomogeenisuus, kuten koetelan pituussuuntainen hitsisauma. Lisäksi heittoa aiheuttaa terminen alkutaipuma. Heittoa esiintyy myös, jos telan geometrinen keskilinja ei ole yhdensuuntainen pyörimisakselin kanssa.

Kieppumista aiheutuu, jos telan poikkileikkauksen massakeskipiste ei ole samalla telan geometrinen keskipiste. Kieppuminen sisältyy heiton arvoon. Pelkistettynä kieppuminen voidaan esittää kuvan 2.3.3–1 mukaisesti. Kiekon massakeskipiste G on etäisyydellä e kiekon geometrisestä keskipisteestä S . Kulmanopeudella ω pyörivä akseli taipuu epäkeskeisyyden aiheuttaman keskipakovoiman vuoksi. Tällöin piste S siirtyy pois laakerikeskiöiden yhdysjanalta. /18/



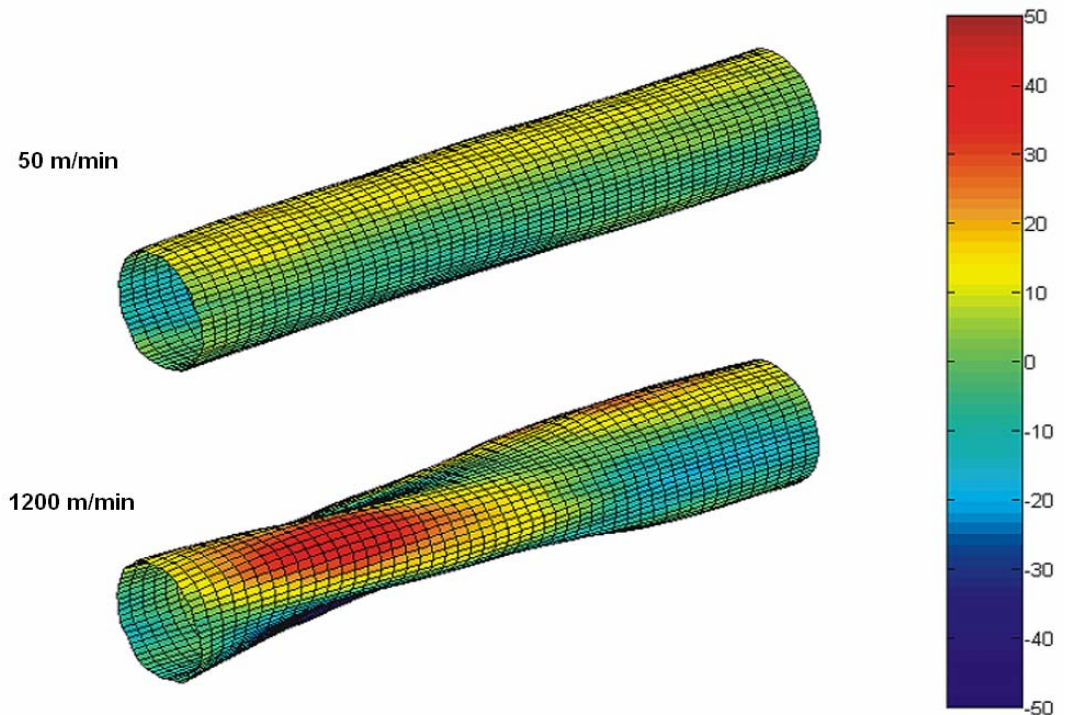
Kuva 2.3.3–1. Kiekon asema pyörivän akselin päästä katsottuna, kun akseli on taipunut. Piste O on laakerikeskiöiden yhdysjanalla.

Lähteen /18/ mukaan voidaan osoittaa, että akselin taipumataso pyörii akselin kulmanopeudella. Kun kulmanopeus on vakio, myös akselin jännitystila on vakio.

2.3.4 Kuorimuodonmuutos

Kuorimuodonmuutos on telan säteen suuntaisten voimien aiheuttamaa muodonmuutosta. Merkittävä telavaipan kuorimuodonmuutosten aiheuttaja on seinämänpaksuusvaihtelut. Kuvan 2.1.1-2 mukainen epätasainen seinämänpaksuusjakauma aiheuttaa epätasaisen massajakauman. Sen takia vaipassa on kehän suuntaista jäykkyyssvaihtelua, jolloin keskeisvoimat aiheuttavat telan säteen suuntaisia jännityksiä ja kuorimuodonmuutoksia. Lisäksi kuorimuodonmuutoksia voivat aiheuttaa telan muut geometria- ja rakennevirheet, kuten pituussuuntainen hitsisauma. Hitsisauman vaikutus kuorimuodonmuutoksiin on kuitenkin yleensä pieni verrattuna telavaipan paksuusvaihtelun aiheuttamiin kuorimuodonmuutoksiin.

Uusien paperikoneiden ajonopeuden nousu on edellyttänyt telojen ominaistajuuden korottamista vastaavasti. Ominaistaajuutta voidaan korottaa joko telan jäykkyyttä kasvattamalla tai massaa pienentämällä /3/. Pienennettäessä massaa telan vaippaa ohentamalla pienenee myös jäykkyys. Usein päädytäänkin telan halkaisijan kasvattamiseen, jolloin jäykkyyttä saadaan kasvatettua. Halkaisijan kasvattaminen kuitenkin altistaa telavaippaa kuorimuodonmuutoksille. Kuorimuodonmuutosta telan vaipassa on havainnollistettu kuvassa 2.3.4–1.



Kuva 2.3.4–1. Telavaipan kuorimuodonmuutoksia havainnollistava putkitelan geometriamittaustulos kahdella ajonopeudella. /27/

2.3.5 Taivutusjäykkyysvaihtelu

Taivutusjäykkyys on kimmomoduulin ja jäyhyysmomentin tulo EI /12/. Tässä tapauksessa telaa voidaan käsitellä palkkina, jolla on taivutusjäykkyysvaihtelua. Taivutusjäykkyysvaihtelua syntyy, kun palkin pääjäyhydet ovat erisuuret.

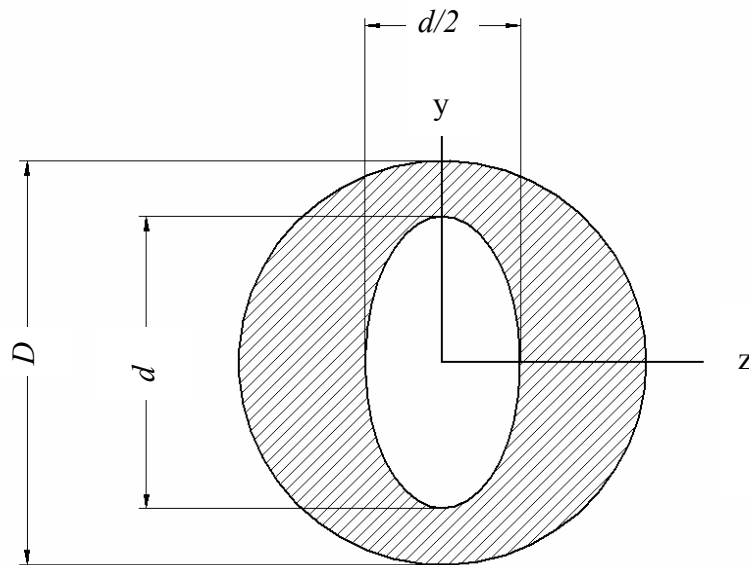
Taivutusjäykkyysvaihtelu vaikuttaa telan pyöriessä muun muassa heittoon ja aiheuttaa värähtelyitä. Taivutusjäykkyysvaihtelua aiheuttaa tyypillisesti massan epätasainen jakautuminen poikkileikkauksessa. Tätä voi aiheuttaa vaipan seinämän-paksuusvaihtelu, ympyrämäisyysvirhe tai materiaalin epähomogeenisuus. Kuten kappaleessa 2.3.2 on mainittu, muun muassa pyörimiskeskion liike vaikuttaa telavaipan ympyrämäisyyteen.

Tutkimuksen verifiointissa käytettiin telaa, jonka sisäreikä on ellipsin muotoinen. Kuvan 2.3.5–1 mukaisella telalla jäyhyysmomentit z - ja y -akseleiden suhteen ovat

$$I_z = \frac{\pi}{64}(D^4 - \frac{d^4}{2}) \text{ ja} \quad (1)$$

$$I_y = \frac{\pi}{64}(D^4 - \frac{d^4}{8}) \quad (2)$$

Kaavoista 1 ja 2 havaitaan, että tässä tapauksessa jäyhyysmomentti on suurempi y -akselin suhteen.



Kuva 2.3.5–1. Poikkileikkauksen mitat.

2.4 Aikaisemmat mallinnukset

Kinnunen /29/ tutki diplomityössään paperikoneen komposiittitelan kuorimuodonmuutosta. Työn tavoitteena oli selvittää komposiittivaipan muodonmuutosten taustalla olevia syitä. Kinnunen mallinsi komposiittitelan sekä jäykisterenkaita. Vaipan tarkastelu suoritettiin käyttäen I-DEAS- ja Abaqus-laskentaohjelmia. Mallinnuksessa käytettiin 20-solmuisia särmiöelementtejä. Elementtien sivusuhteena käytettiin 1:10. Kehän suunnassa oli 32 elementtiä ja akselin suunnassa 146 elementtiä. Näillä arvoilla saadaan Kinnusen mukaan riittävän tarkkoja tuloksia. Muodonmuutosten havaittiin johtuvan materiaalin epätasaisesta poistumisesta vaipan pintakerroksista hionnan yhteydessä. Komposiittitelan mallinnuksessa saatuja tuloksia ei voida suoraan verrata tässä työssä käytettyyn terästelalla saatuihin tuloksiin. Kinnusen tulokset antavat kuitenkin viitteitä siitä, että putkitelan seinämänpaksuusvaihtelut voivat aiheuttaa suuriakin muodonmuutoksia.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA - LAITTEISTOT

Tässä työssä tela mallinnettiin tilavuusmallina. Verifiointimallin muodonmuutokset laskettiin Elmer-ohjelmistolla ja malli verifioitiin vertaamalla tuloksia Abaqus-ohjelmistolla laskettuihin muodonmuutoksiin. Mallitettavan koekappaleen vaipan paksuusvaihtelut saatiin ultraäänimittauksista. Koekappaleesta tehtiin Elmer-ohjelmistolle FE-malli, jolla laskettiin muodonmuutoksia. Tulosten jälkikäsittely tehtiin Matlab-ohjelmistolla.

3.1 Koekappale

Mallitettava koekappale (kuva 3.1–1) oli tutkimuskäytössä oleva paperikoneen teräpäällystysaseman vastatela, jonka pituus on 8 m, ulkohalkaisija 1,45 m ja massa noin 18 000 kg. Vaipan nimellinen seinämänpaksuus on 40 mm. Koetelassa on yksi kehän suuntainen ja kaksi pituussuuntaista hitsisaumaa. Tela on aikoinaan poistettu tuotantokäytöstä huonon dynaamisen käyttäytymisen takia. Telan pinta hiottiin ennen ultraäänimittauksia.



Kuva 3.1–1. Mallitettava koetela TKK:n Koneensuunnittelun laboratorion telahallin hiomakoneella 31.5.2006.

3.2 Mallin verifiointi

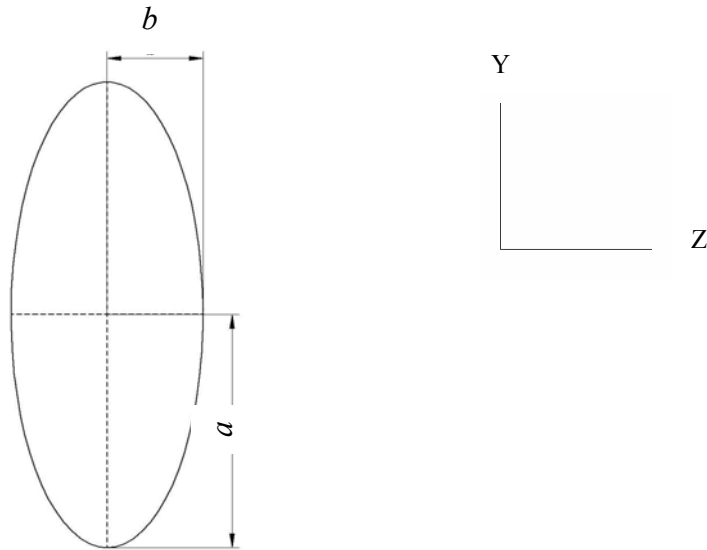
Matlab-ohjelmistolla toteutetun ohjelman ja sen luomien Elmer-tiedostojen toimivuus todennettiin verifiointilla. Mallinnusketju verifioidaan seuraavasti: Abaqus-ohjelmistolla mallinnettiin telavaippa, jonka pituus ja ulkohalkaisija ovat samat kuin koetelalla. Mallin sisäreiästä tehtiin ellipsin muotoinen (kuva 3.2.1), jotta tarkasteltavasta tapauksesta saadaan epäsymmetrinen. Symmetrisessä tilanteessa tietyt symmetriasta johtuvat virheet olisivat voineet jäädä huomaamatta. Kaavasta 3 pystytään laskemaan likimääräisesti telan seinämänpaksuus kulman muutoksen funktiona. Seinämänpaksuus laskettiin 24 kohdasta, jonka jälkeen tuloksi käytettiin seinämänpaksuusmatriisin lähtötietoina. Seinämänpaksuusmatriisin perusteella tehtiin Elmer-ohjelmistoa varten elementti-, solmu-, reunaehto- ja otsikkotiedostot. Elmer- ja Abaqus-malleissa tarkasteltiin suurinta siirtymää y -suunnassa. Siirtymiä laskettiin eri elementeillä ja elementtimäärillä. Abaqus-ohjelmistolla laskettuja tuloksia verrattiin Elmer-mallin vastaaviin tuloksiin. Abaquksen ja Elmerin laskemia tuloksia vertaamalla valittiin kummallekin ohjelmalle sopivimmat elementit ja sopiva elementtimäärä. Kun siirtymät vastaavat toisiaan, Elmer-mallin toiminta on verifioitu.

Ellipsin yhtälö /24/ on

$$y(x)^2 = \left(\frac{a}{b}\right)^2 (b^2 - z^2), \quad (3)$$

missä b = pikkuakselin pituus ja

a = isoakselin pituus.



Kuva 3.2.1. Ellipsi.

Verifiointimallin dimensiot valittiin koetelan mukaan. Ulkomitoiksi asetettiin: Pituus $L = 8$ m, halkaisija $D = 1,45$ m. Ellipsin mitat valittiin sopiviksi helpottamaan seinämänpaksuuslaskentaa. Ellipsin pikkuakselin pituudeksi asetettiin $\sqrt{0,4^2 + 0,4^2} \approx 0,5657$ m ja isoakselin pituudeksi asetettiin $\sqrt{0,5^2 + 0,5^2} \approx 0,7071$ m. Näillä arvoilla muodostettiin Mathcad-ohjelman avulla seinämänpaksuusmatriisi, jonka geometriatietoja käytettiin

3.3 FE-analyyseissä huomioon otettavia asioita

Putkitelan FE-mallinnus voidaan tehdä palkkimallina, kuten lähteessä /4/ on tehty. Palkkimallilla ei voida tarkastella kuorimuodonmuutoksia. Telan kuorimuodonmuutosten analysoimiseksi elementtimalli täytyy tehdä tilavuusmallinnuksena, koska kuorielementeillä paksuus jakautuu symmetrisesti neutraaliakselin suhteen. Seuraavassa on otettu esille FE-analyyseissä huomioonotettavia asioita, jotka johtuvat telan valmistuksesta.

Telavaipan seinämänpaksuus mitataan ultraäänilaitteella. Matlab-ohjelma syöttää seinämänpaksuustiedot automaattisesti FE-mallille.

Hitsisauman muutosvyöhykkeet on mahdollista ottaa huomioon mallinnuksessa.

Hitsisauman elementeille on asetettava eri materiaaliominaisuudet, jos hitsisauman kimmomoduuli eroaa telan kimmomoduulista E (200 GPa). Tällöin hitsisauman käyttäytyminen kuormituksen alaisena eroaa telan perusaineen käyttäytymisestä.

Sorvatussa telassa hitsisauma ei näy ulkopinnalla. SisäSORvaamattomaan vaippaan jää kuitenkin sisäpinnalle ulkoneva hitsin juurikupu, jonka geometrinen muoto otetaan huomioon seinämäpaksuusmittauksessa ja siten myös mallinnuksessa.

3.4 Mallinnusten yksinkertaistukset

Elmer- sekä Abaqus-mallinnuksessa käytettyjä yksinkertaistuksia:

- FE-mallin päädyt on kiinnitetty jäykästi,
- koetelan hitsisauman kimmomoduuli oletettiin samaksi kuin perusaineella,
- koetelan pinnanlaatu oletettiin virheettömäksi, koska vaikutus kuorimuodonmuutokseen on pieni suhteessa seinämäpaksuusvaihteluiden aiheuttamiin virheisiin,
- ultraäänilaitteen tuottama spiraalimainen mittaustulos muutettiin ortogonaaliseksi matriisiksi,
- mahdollista koetelan päätyakselien erikeskeisyyttä ei otettu huomioon ja
- Elmer-malli on staattinen, jolloin pyörimisen aiheuttama keskeisvoima ilmaistiin elementteihin sijoitetuilla tilavuusvoimilla eikä vakiokulmanopeudella pyörimisakselin ympäri.

3.5 Elementit

3.5.1 Levyt, laatat ja kuoret

Kuorirakenteilla tarkoitetaan yleensä yhteen tai kahteen suuntaan kaarevia, ohuita pintakannatteita. Kuorirakenteet voidaan mallintaa monella eri tavalla. Ohuen kuoren käyttäytymisen kuvaamiseen riittää keskipinnan muodonmuutostilan tunteminen. Kalvo- ja taivutustilan välinen kytkentä tekee kuitenkin kuoritehtävät monimutkaisiksi. Levyä voidaan pitää yksiulotteisen suoran veto- tai puristussauvan kaksiulotteisena vastikkeena. Levy kantaa kuormitusta vain keskipinnan suunnassa keskipinnan pysyessä kuormituksen jälkeenkkin tasona.

Laatat kantavat kuormitusta keskipintaa vastaan kohtisuorassa tasossa. Laatat jaetaan ohuisiin ja paksuihin laattoihin. Ohuissa laatoissa paksuussuuntainen jännitys

jätetään pienenä kokonaan pois ja kuormittamattoman tilan keskipinnan normaalit pysyvät muodonmuutoksissa suorina ja kohtisuorassa keskipintaa vastaan. Ohuet jäykät laatat kantavat kohtisuoran kuormituksen sisäisin momenteilla ja leikkausvoimin. Taipuisissa ohuissa laatoissa suuren taipuman vuoksi myös laatan keskipinnan suuntaiset kalvojännitykset osallistuvat kuormituksen kantamiseen.

Paksu laatta noudattaa usein pienten taipumien teoriaa. Paksuissa laatoissa luovutaan kuitenkin oletuksesta, että laatan kuormittamattoman tilan keskipinnan normaalit pysyvät muodonmuutoksissa kohtisuorassa keskipintaa vastaan. Tällöin otetaan huomioon kohtisuora leikkausmuodonmuutos. Edelleenkin oletetaan kuitenkin, että normaalit pysyvät suorina. Laatan keskipinnan taipuma ei tällöin yksistään riitä laatan kaikkien pisteiden muodonmuutosten määrittämiseen. Sen lisäksi tarvitaan keskipinnan normaalien kiertymiskulmat, jotka ovat keskipinnan taipumasta riippumattomia muuttujia. Levyn ja laatan paksuudet ovat keskipinnan suhteen symmetrisiä ja niiden paksuus on useimmiten vakio. /25,26/

Yhdistämällä sopivat levy- ja laattaelementit voidaan muodostaa tasomaisia kuorielementtejä. Kuoren geometria pystytään näillä elementeillä kuvaamaan vain likimääräisesti /26/. Lisäksi paksuussuuntainen venymä ja jännitys jää ottamatta huomioon. Yleisesti tasomaiset elementit eivät ole hyvä ratkaisu yleisissä kuoritehtävissä /25/.

3.5.2 Kolmidimensioiset elementit

Kuoritehtävien yhteydessä voidaan käyttää myös kolmidimensioisia elementtejä. Linearisella elementillä kokonaissiirtymätila reunalla on lineaarinen. Tällöin päätesolmujen vapausasteet määrittävät siirtymätilan tällä reunalla. Paremmin kuoritehtäviin sopii parabolinen elementti, jonka reunapinnat voivat olla toisen asteen pintoja. 20-solmuinen parabolinen särmiöelementti (Kuva 3.5–4) on sellaisenaan sopiva suhteellisen paksujen kuorien yhteydessä. Haasteena on vain tarvittavien lähtötietojen runsaus, koska kuoren ala-, ylä- ja keskipinnalla olevat solmut täytyy määrittää.

Paraboolisten elementtien yhteydessä numeerinen integrointi on välttämätöntä, koska integraalit ovat yleisesti hankalia murtofunktoita. Numeeriseen integrointiin on

perusteltua käyttää Gaussin integrointikaavoja. Elementtien lukumäärää lisäämällä saadaan yhä tarkempia tuloksia eli menetelmä konvergoi kohti oikeata ratkaisua. Konvergenssin takaamiseksi tulisi periaatteessa pyrkiä mahdollisimman tarkkaan integrointiin. Useissa tapauksissa pieni integrointipisteiden lukumäärä (vähennetty integrointi) antaa parempia tuloksia. Tämä johtuu siitä, että elementtimatriisien integrandeissa esiintyvät korkeamman asteen termit tulevat esimerkiksi pitkissä kapeissa elementeissä hallitseviksi vääristäen elementin käyttäytymistä. Vähennettyä Gaussin integrointia (kohta 3.5.3) sovellettaessa nämä korkeamman asteen termit jäävät pois ja tuloksena on usein paremmin käyttäytyvä malli. Tämän työn FE-malleissa syntyy pitkiä kapeita elementtejä, jos akselin suunnassa on runsaasti enemmän elementtejä kuin kehän suunnassa, joten tässä tutkimuksessa käytettiin myös vähennettyä integrointia käyttäviä elementtejä. /25,30/

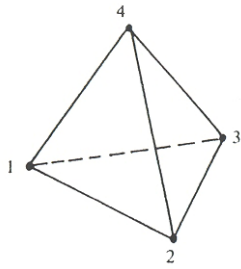
Elementtiä sanotaan epäkonformiksi tai yhteensopimattomaksi (incompatible), jos elementti ei toteuta kaikkia jatkuvuusehtoja. Jatkuvuusehdot voidaan kiteyttää seuraavasti /25/:

- jäykän kappaleen liikkeen on oltava mahdollinen ilman venymiä,
- elementin on pystyttävä kuvaamaan vakiovenymätila ja
- siirtymien ja tarvittavien derivaattojen on oltava riittävän jatkuvia myös elementtien välillä

Epäkonformit elementit saattavat olla jopa parempia kuin konformit elementit, jotka ovat usein liian jäykkiä. Joistakin jatkuvuusehdoista luopuminen tekee mallin joustavammaksi, jolloin tulos voi olla parempi. Tässä tutkimuksessa käytettiin myös epäkonformeja elementtejä.

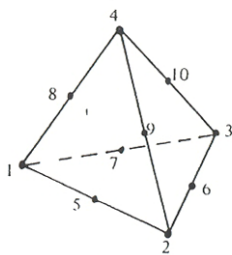
Lineaaristen ja parabolisten elementtien lisäksi on mahdollista käyttää kuutiollisia elementtejä. Niitä käytettäessä solmujen ja vapausasteiden lukumäärä kasvaa helposti huomattavasti suuremmaksi kuin lineaarisilla ja parabolisilla elementeillä. /25/

Mallin verifiointiin yhteydessä käytettiin useita erilaisia kolmidimensioisia elementtejä. Kuvissa 3.5–2 ja 3.5–3 on esitetty Elmer- ja Abaqus-malleissa käytetyt tetraedrielementit. Lisäksi kuvissa 3.5–4 ja 3.5–5 on esitetty Abaqus-malleissa käytetyt särmiöelementit.



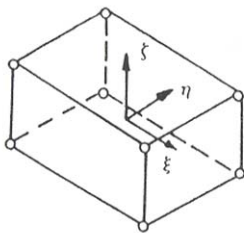
- 3×4 vapausastetta
- Täydellinen 1. asteen interpolaatiopolynomi
- Lineaariset siirtymät
- Vakiovenymät

Kuva 3.5-1. Lineaarinen 4-solmuinen tetraedrielementti C3D4. /25/



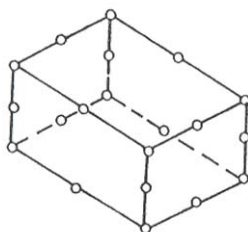
- 3×10 vapausastetta
- Täydellinen 2. asteen interpolaatiopolynomi
- Paraboliset siirtymät
- Lineaariset venymät

Kuva 3.5-2. Paraboolinen 10-solmuinen tetraedrielementti C3D10M. /25/



- 3×8 vapausastetta
- Täydellinen 1. asteen interpolaatiopolynomi
- Lineaariset siirtymät
- Vakiovenymät

Kuva 3.5-3. Lineaarinen 8-solmuinen särmiöelementti C3D8R ja C3D8i. /25/



- 3×20 vapausastetta
- Täydellinen 3. asteen interpolaatiopolynomi
- Kuutiolliset siirtymät
- Paraboliset venymät

Kuva 3.5-4. Paraboolinen 20-solmuinen särmiöelementti C3D20R ja C3D20H. /25/

3.5.3 Gaussin integrointi

Elementtimatriiseja muodostettaessa joudutaan toistuvasti laskemaan erilaisia viiva-, pinta ja avaruusintegraaleja. Varsinkin korkeamman asteen elementtien yhteydessä näiden analyttinen määrittäminen on työlästä. Gaussin integrointi on numeerista integrointia, jossa funktion integraali korvataan tietyissä pisteissä laskettujen funktion arvojen painotetulla summalla. Lisäksi integrointipisteiden paikat on määritetty siten, että saavutetaan mahdollisimman hyvä tarkkuus polynomeja integroitaessa. Haluttaessa parempaa tarkkuutta lisätään integrointipisteiden lukumäärää. Tarkastellaan kolmannen asteen polynomin integroimista /25/

$$f(\xi) = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2 + a_3\xi^3, \quad (4)$$

missä ξ = integrointipisteen koordinaatti ja

a_i = mielivaltainen vakio

Analyttisesti integroiden saadaan yhden integrointipisteen ξ avulla

$$\int_{-1}^1 f(\xi) d\xi = 2(a_0 + \frac{a_2}{3}) \quad (5)$$

Vaaditaan nyt, että sama tulos saadaan kahden integrointipisteen ξ_1 ja ξ_2 sekä vastaavien painokertoimien h_1 ja h_2 avulla eli

$$\begin{aligned} 2(a_0 + \frac{a_2}{3}) &= h_1 f(\xi_1) + h_2 f(\xi_2) \\ &= h_1(a_0 + a_1\xi_1 + a_2\xi_1^2 + a_3\xi_1^3) + h_2(a_0 + a_1\xi_2 + a_2\xi_2^2 + a_3\xi_2^3) \end{aligned} \quad (6)$$

asettamalla mielivaltaisten vakioiden a_i kertoimet yhtä suuriksi saadaan yhtälöt

$$\begin{aligned}h_1 + h_2 &= 2 \\h_1\xi_1 + h_2\xi_2 &= 0 \\h_1\xi_1^2 + h_2\xi_2^2 &= \frac{2}{3} \\h_1\xi_1^3 + h_2\xi_2^3 &= 0\end{aligned}\tag{7}$$

Tämän yhtälöryhmän ratkaisu on

$$\begin{aligned}h_1 = h_2 &= 1 \\ \xi_1 = -\xi_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,57735\end{aligned}\tag{8}$$

Laajempi kuvaus kolmidimensioisten elementtien integroinnista on esitetty lähteessä /30/ sivulta 3.2.3-1 alkaen.

3.6 Ohjelman toimintaperiaate

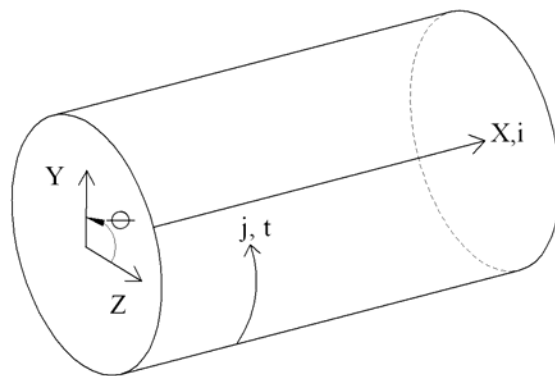
Seuraavassa on tarkempi kuvaus Matlab-ohjelmistolla tehdyn ohjelman toimintaperiaatteesta.

Aluksi mallille annetaan geometriset mittasuureet. Tämän jälkeen ladataan seinämänpaksuusmatriisi ASCII-muotoisena. Tässä yhteydessä ASCII-muotoisesta mittaustiedostosta käytetään nimeä tulostiedosto. Tulostiedostosta poistetaan ensimmäinen rivi, joka sisältää pituusakselin koordinaatin millimetreinä. Muut rivit ovat seinämänpaksuuden arvoja millimetreinä. Tällöin taulukon sarakkeiden määrä m on mittapisteiden lukumäärä x -suunnassa ja rivien määrä n on mittapisteiden lukumäärä t -suunnassa (Kuva 3.6–1). Taulukko täydennetään kulman suhteen periodiseksi kopioimalla ensimmäinen rivi viimeiseksi riviksi. Taulukkoon tehdään uusi ensimmäinen ja viimeinen sarake kopioimalla vastaavasti ensimmäinen ja viimeinen sarake. Nyt $m = m + 2$ ja $n = n + 1$.

Seuraavaksi päästään määrittämään vaipan sisäpinnan solmupisteiden x , y ja z -koordinaatit sekä myöhemmin tarvittava t -koordinaatti. Aluksi muodostetaan silmukat i ja j pituusakselin- ja kehän suuntaisesti. Silmukoiden i ja j , vaipan paksuuden h , ja kehän suuntaisen koordinaatin t avulla saadaan määriteltyä

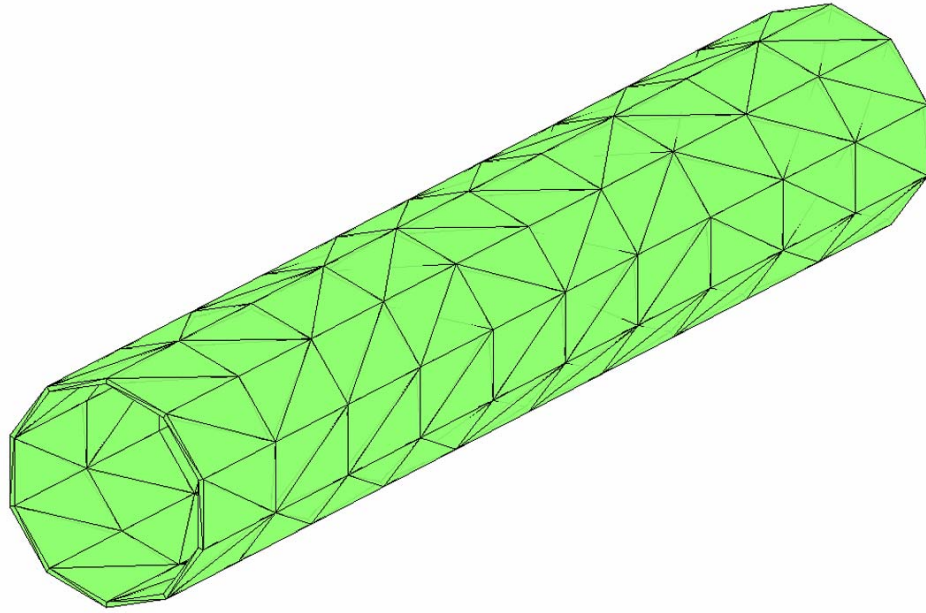
matemaattiset funktiot $x(i)$, $y(d, h, t)$ ja $z(d, h, t)$. Vaipan paksuus h saadaan aliohjelman avulla tulostiedostosta. Aliohjelman toiminta esitellään myöhemmin. Vaipan ulkopinnan solmupisteet määritetään vastaavalla tavalla kuin sisäpinnallekin.

Vaipan paksuus kohdassa x_i, t_j määräytyy tulostiedostosta vastaavan sisä- ja ulkopinnan solmupisteiden välisellä erolla. Solmupisteiden x, y ja z koordinaatit luetaan matriisista **XYZ**. Nyt malli sisältää kaikki solmupisteet. Lopuksi tehdään taulukko **TRI**, joka sisältää neljäsolmuisten tetraelementtien solmupisteiden numerot. Solmupisteiden paikat luetaan **XYZ** matriisista. Taulukon **TRI** yhdellä rivillä on aina yhden elementin solmupisteet ja rivejä on yhtä monta kuin elementtejäkin.



Kuva 3.6–1. Käytettyjä merkintöjä.

Seuraavaksi mallista poistetaan sisällä olevat elementit. Elementti hyväksytään, jos vähintään yksi elementin neljästä solmupisteestä on mallin vaipan keskipinnan ulkopuolella ja yksi sisäpuolella. Kuva 3.6–2 on telamalli, josta on poistettu sisältä ylimääräiset elementit. Edelleen on käytetty elementtien määrissä arvoja $N_x = 10$ ja $N_t = 10$.



Kuva 3.6–2. Telamalli sisäelementit poistettuna.

Koetelan todellinen massa on 18 000 kg. Mallin tilavuus ja massa lasketaan, jotta mallin oikeellisuutta voidaan arvioida. Tässä vaiheessa kirjoitetaan myös tarvittavat tiedostot Elmer-ohjelmistoa varten. Mallin reunaelementeille asetetaan siirtymäreunaehdot. Ohjelma asettaa mallin päät jäykästi kiinnitetyiksi, joten siirtymät reunoilla asetetaan nolliksi x , y ja z suuntaan. Ehdossa ei ole hyvä käyttää lukuarvoa nolla, jolloin reunaelementit haetaan seuraavalla logiikalla: elementti on reunalla $x=0$, jos elementin kolmen solmupisteen x -koordinaatit $< 1,0 \cdot 10^{-6}$. Vastaavasti elementti on reunalla $x=L$, jos elementin kolmen solmupisteen x -koordinaatit $> L - 1,0 \cdot 10^{-6}$. Lopuksi kirjoitetaan otsikkotiedostot Elmer-ohjelmistoa varten.

Seuraavaksi esitellään mitatun seinämänpaksuusmatriisin käsittelyä tekevän aliohjelman toimintaperiaatetta: mittauspisteitä on paljon suurempi määrä, kuin mallinnuksessa tarvittavien verkon solmupisteiden määrä. Jos verkon solmupisteiden määrä valitaan samaksi, kuin mittausdatan määrä, elementtiverkosta tulee helposti liian tiheä. Verkon solmupisteiden koordinaatit määritellään aliohjelman avulla, jotta verkon kokoa voidaan muuttaa mittauspisteiden määrästä riippumatta.

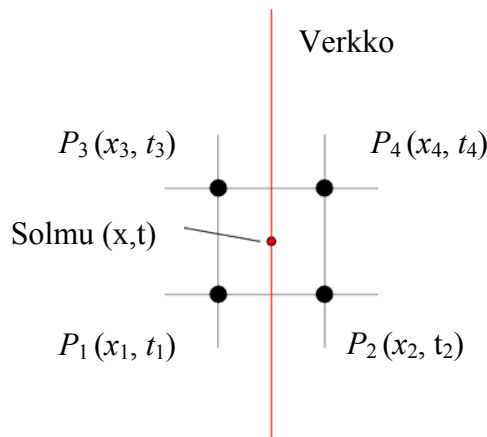
Aliohjelma hakee seinämänpaksuusmatriisista aina jokaiselle verkon solmupisteelle (x, t) neljä lähintä mittapistettä (P_1, P_2, P_3, P_4) . Tämän jälkeen elementin paksuus solmupisteen kohdalla määritellään Lagrangen kantafunktioiden avulla mittauspisteistä P_1, P_2, P_3 ja P_4 interpoloimalla (kuva 3.6–4). Lähteen /22/ mukaisesti aluksi muodostetaan kantapolynomit $\{\phi_i(x_i)\}$, jotka saavat arvon $\phi_i(x_i) = 1$ interpolointipisteessä $x_i \in [a, b]$ ja arvon $\phi_i(x_j) = 0$ kaikissa muissa pisteissä $x_{i, j} \neq i$. Kantapolynomit voidaan kirjoittaa 1.asteen monomien tulona /22/

$$\phi_i(x) = \prod_{j=0 \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}. \quad (9)$$

Lagrangen kantafunktiot /22/ (10)

$$\phi_1 = \frac{(x - x_2)(t - t_3)}{(x_1 - x_2)(t_1 - t_3)}, \quad \phi_2 = \frac{(x - x_1)(t - t_4)}{(x_2 - x_1)(t_2 - t_4)},$$

$$\phi_3 = \frac{(x - x_4)(t - t_1)}{(x_3 - x_4)(t_3 - t_1)} \quad \text{ja} \quad \phi_4 = \frac{(x - x_3)(t - t_2)}{(x_4 - x_3)(t_4 - t_2)}.$$



Kuva 3.6–3. Solmupisteen interpolointi.

Tämän jälkeen kantafunktiot ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 ja ϕ_4 saavat arvon väliltä 0...1. Lopullinen elementin paksuus solmupisteen kohdalla määritellään mittauspisteiden paksuuden P_1, P_2, P_3, P_4 ja kaavan (10) avulla seuraavasti

$$Tulos = \phi_1 \cdot P_1 + \phi_2 \cdot P_2 + \phi_3 \cdot P_3 + \phi_4 \cdot P_4. \quad (11)$$

3.7 Seinämänpaksuusmittaus

3.7.1 Ultraäänimittauksen periaate

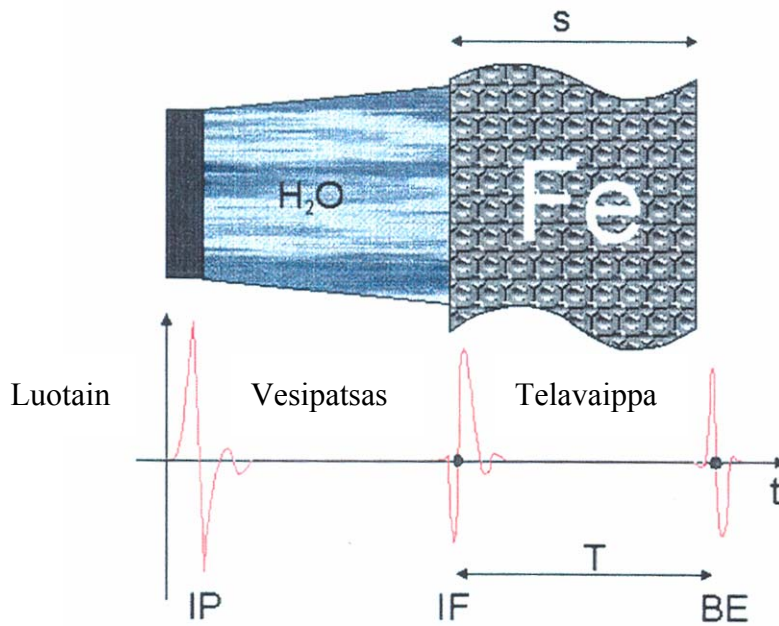
Ultraääniluotain lähettää 5 MHz:n taajuisia ääntä kohti mitattavaa kappaletta. Ääni kulkee anturielementin pinnasta vesipatsaan sisällä telan ulkopintaan. Ääniaalto heijastuu veden ja metallin välisestä akustisesta rajapinnasta aiheuttaen kaiun IF (Kuva 3.7.1–1) /29/. Osa äänisignaalista jatkaa metallin läpi telan sisäpinnalle ja heijastuu jälleen metallin ja ilman rajapinnasta aiheuttaen kaiun BE /29/. Seinämänpaksuus lasketaan ulko- ja sisäpinnasta heijastuvan kaiun kulkuajasta kaavalla

$$s = \frac{1}{2}vT, \quad (12)$$

missä s = seinämänpaksuus

v = äänennopeus materiaalissa

T = etu- ja takaseinämän kaiun välinen kulku-aika

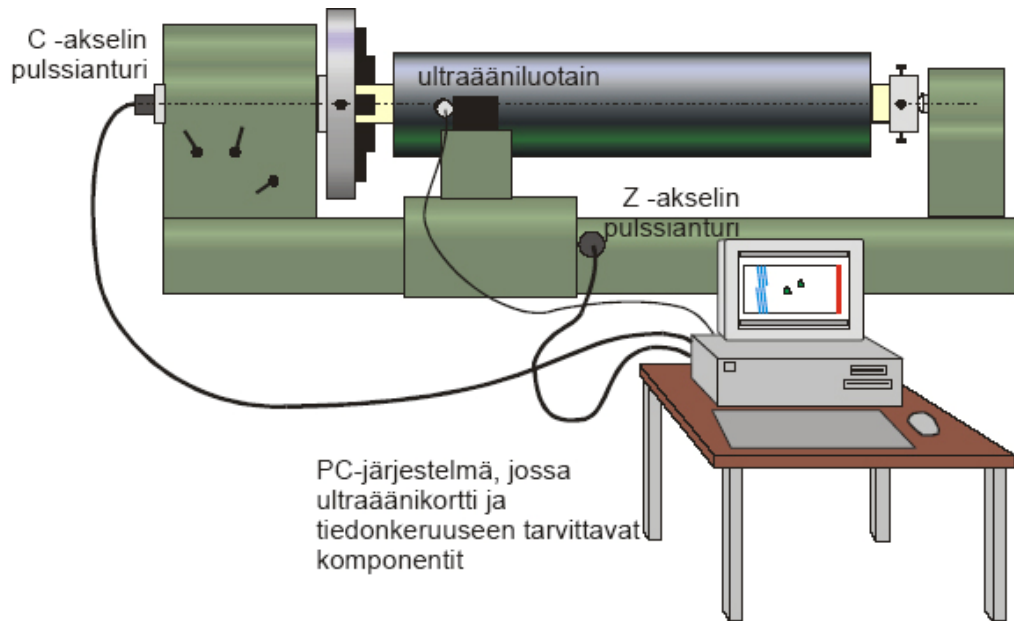


Kuva 3.7.1–1. Seinämänpaksuus lasketaan etu- ja takaseinästä heijastuvan kaiun kulkuajasta. /29/

3.7.2 Laitteisto

Mittaukset tehtiin TKK:n Koneensuunnittelun laboratorion telasorvissa. Koetelan seinämänpaksuus mitattiin ultraäänilaitteistolla, jonka periaate näkyy kuvassa 3.7.2–1. Sorvin karaan (C-akseli) oli kiinnitetty pulssianturi, jolla luettiin telan pyörimiskulma. Sorvin kelkkaan oli kiinnitetty pulssianturi, jolla luettiin pituussuuntainen (Z-akseli) sijainti. Ultraäänimittauksessa käytettiin ultraäänikorttia Krautramer USPC 2100, joka oli liitetty PC-järjestelmään. Ultraääniluotaimena käytettiin luotainta H5KF (Krautkrämer). Mittaukset talletettiin tietokantaan. /20/

Telaa pyöritettiin telasorvissa ja ultraääniluotainta siirrettiin sorvin kelkan avulla telan akselin suunnassa. Vaikka ultraäänimittausta käytetään telavaipan seinämänpaksuusvaihteluiden mittaukseen, samalla voidaan havaita myös telavaipan hitsisauman mahdollisia virheitä, kuten liitosvirheet, vajaa hitsautumissyvyys ja kuona. Pienin varauksin voidaan havaita myös huokoisuudet sekä halkeamat.



Kuva 3.7.2-1. Mittausjärjestelmän periaatekuva /20/.

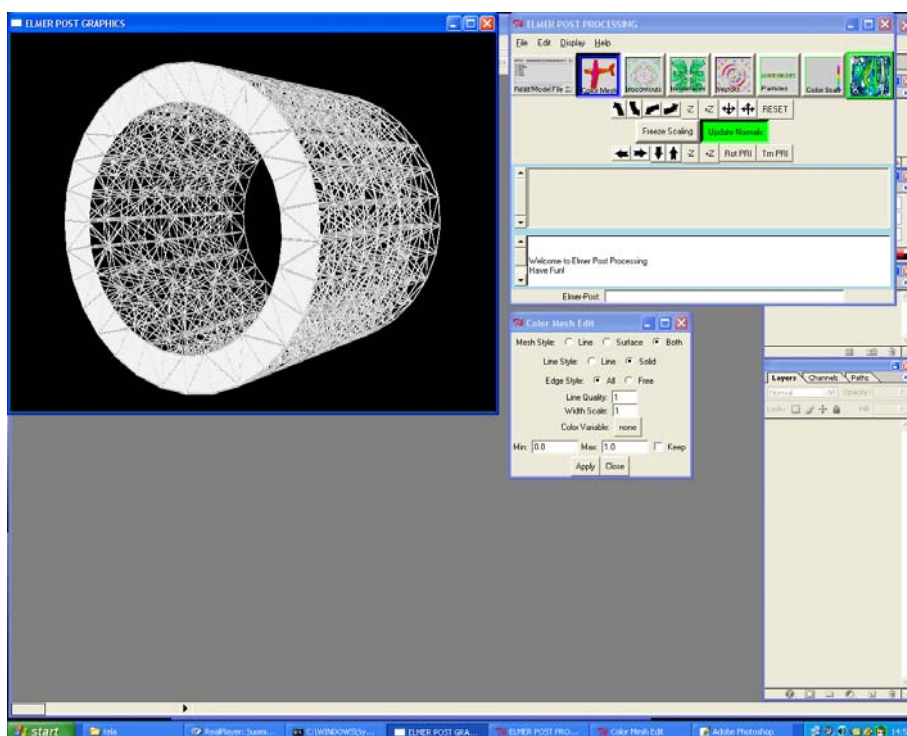
Ultraäänimittauslaitteen toistotarkkuutta oli tutkittu lähteessä /4/ mittaamalla sekä sorvattua että sorvaamatonta pyörivän koetelan pintaa. Vastinpinnalla tai telan pyörimisnopeudella (0...214 r/min) ei ollut havaittavaa vaikutusta toistotarkkuuteen. Välillä 38,9...41,00 mm suurin absoluuttinen virhe oli noin 0,2 mm. Absoluuttiseksi mittaustarkkudeksi erillisellä kalibroitikappaleella kyseisessä tutkimuksessa saatiin 0,1 mm. Tässä työssä käytetyn koetelan nimellinen paksuus on noin 40 mm, jolloin koelaitteiston tarkkuus on riittävä.

4 TULOKSET

4.1 Mallin ohjelmoiminen ja analysointi

Koetela kuvaavan elementtimallin muodostamiseen tarvittava ohjelma tehtiin Matlab-ohjelmistolla. Ohjelma tekee solmu-, elementti- sekä reunaehtotiedostot Elmer-ohjelmistolle. Tämän jälkeen Elmer-ohjelmistolla voidaan laskea ja tarkastella muun muassa malliin asetettujen voimien aiheuttamia muodonmuutoksia ja jännityksiä. Ohjelma laskee myös telavaipan tilavuuden sekä massan, jolloin voidaan arvioida karkeasti mallin oikeellisuus. Lisäksi ohjelma piirtää mallista kolmiulotteisen kuvan.

Mallilla tehtiin testejä virheiden löytämiseksi. Mallin periaatekuva ja Elmer Post-ohjelmiston käyttöliittymä näkyy kuvassa 4.1–1.



Kuva 4.1–1. Elmer-ohjelmistolla piirretty kuva telamallista.

Koetelaa kuvaava elementtimalli analysoitiin Elmer-ohjelmistolla. Elmerille luotiin aluksi tekstitiedosto, joka sisälsi Elmer-analyysin kuvauksen, laskennassa käytetyt parametrit ja tilavuusvoimat.

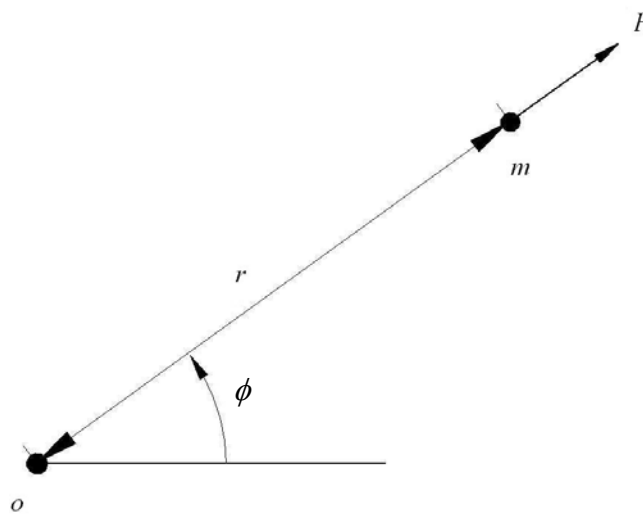
Elmer-ohjelmistoon ei voitu asettaa mallille kulmanopeutta akselin suhteen. Tämän vuoksi telan pyörimisestä johtuvat keskeisvoimat täytyy asettaa malliin tilavuusvoimina. Partikkeliin (massa m) vaikuttavaa voimaa sanotaan keskeisvoimaksi, jos voiman vaikutussuora kulkee aina saman kiinteän pisteen, niin sanotun keskipisteen O kautta (kuva 4.1–2). Seuraavaksi johdetaan tilavuusvoimien kaavat lähteen [23] mukaisesti. Tilavuusvoimat asetettiin vaikuttamaan telan säteen suuntaisesti.

Kuvan 3.7–1 mukaisin merkinnöin keskeisvoima F_r

$$F_r = m \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right), \quad (13)$$

missä r = partikkelin etäisyys keskipisteessä ja

ϕ = kiertymiskulma.



Kuva 4.1–2. Partikkeliin (massa m) vaikuttava keskeisvoima.

Telan analyysi toteutettiin staattisena. Telan pyöriminen vakionopeudella aiheuttaa telan vaippaan keskeisvoiman, jonka suuruus voidaan johtaa kaavasta 13. Koska vaipalla ei ole mainittavaa kiihtyvyyttä säteen suunnassa, voidaan asettaa

$$\frac{d^2r}{dt^2} = 0. \quad (14)$$

Voidaan vielä merkitä

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega = 2\pi n, \quad (15)$$

missä ω = kulmanopeus ja

n = kierrostaajuus.

Tällöin saadaan keskeisvoimaksi F_r

$$F_r = mr\omega^2 = mr(2\pi n)^2 = V\rho r(2\pi n)^2, \quad (16)$$

missä ρ = tiheys ja

V = partikkelin tilavuus.

Telan vaippa on mallinnettu elementeistä. Elementit voidaan ajatella partikkeleiksi, joilla on massa m . Tällöin saadaan kierrostaajuudella n pyörivän massan m aiheuttaman keskeisvoiman lausekkeen (16) avulla vastaavaksi tilavuusvoimaksi säteen suunnassa F_{vr}

$$F_{vr} = \frac{F_r}{V} = \rho r(2\pi n)^2. \quad (17)$$

Telan pyöriminen mallinnettiin asettamalla elementeille säteen suuntainen tilavuusvoima F_{vr} , jonka suuruus vastaa pyörimisliikkeen aiheuttamaa keskeisvoimaa. Tarkastelunopeudeksi koetelalle valitaan tyypillinen paperikoneen tuotantonopeus 1500 m/min. Koetelan ulkokehän pituus L_u

$$L_u = 2\pi r = 2\pi \cdot 0,725, \quad (18)$$

missä r = telan keskisäde.

Tällöin

$$L_u = 2\pi \cdot 0,725 \text{ m} \approx 4,55 \text{ m}. \quad (18)$$

Nyt kierrostaajuus n on

$$n = \frac{1500}{4,55 \cdot 60} \approx 5,49 \text{ Hz}. \quad (19)$$

Arvoilla $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $n = 5,49 \text{ 1/s}$ ja $r = 0,725 \text{ m}$ saadaan lopulta elementin tilavuusvoimaksi säteen suunnassa

$$F_{vr} \approx 6772 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}. \quad (20)$$

Telan painovoima saadaan laskettua seuraavasti /24/

$$G = mg = V\rho g. \quad (21)$$

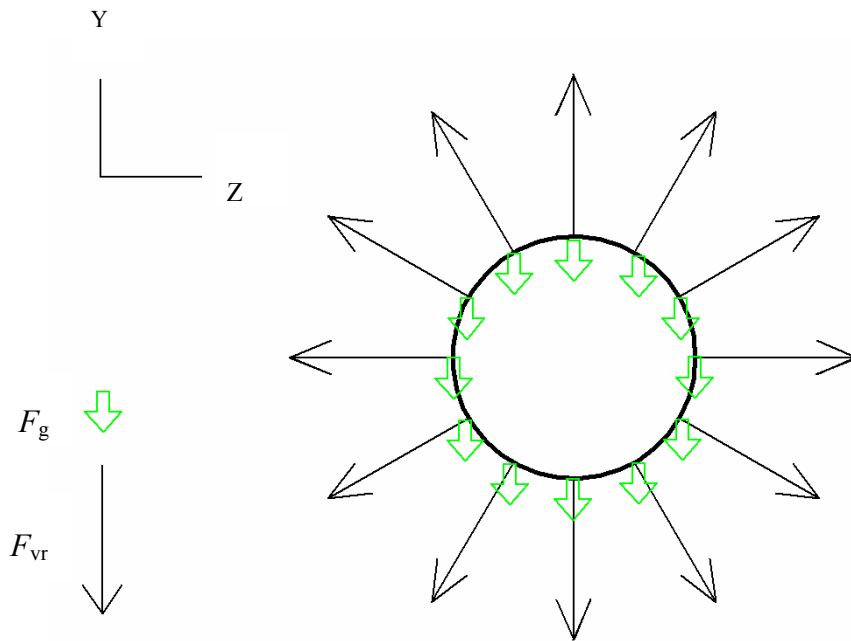
Tällöin painovoimasta aiheutuva tilavuusvoima F_G on

$$F_G = \frac{G}{V} = \rho g. \quad (22)$$

Arvoilla $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,82 \text{ m/s}^2$ saadaan painovoimasta aiheutuvaksi tilavuusvoimaksi F_G

$$F_G \approx 77,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}. \quad (23)$$

Kuvassa 4.1–3 on havainnollistettu elementteihin asetettujen voimien suuntia. Elmerissä käytetty koordinaatisto oli karteesinen, joten säteen kekeisvoimasta aiheutuvat tilavuusvoimat (F_{vr}) asetettiin jokaiselle elementille telan säteen suuntaisesti. Painovoimasta aiheutuva tilavuusvoima (F_G) asetettiin jokaiselle elementille kuvan 4.1–3 koordinaatiston y -akselin negatiiviseen suuntaan. Kuvan 4.1–3 koordinaatisto ei pyöri telan mukana.



Kuva 4.1–3. Elmer-ohjelmistoon asetetut voimat.

4.2 Mallien verifiointi

Elmer-malli verifioitiin Abaqus-laskentaohjelman avulla kappaleen 3.2 mukaisesti. Tulosten tarkastelu rajataan kohdistumaan siirtymiin.

4.2.1 Abaqus

Telan vaippa mallinnettiin tilavuudeksi, joka jaettiin pienempiin osiin käyttämällä särmiöelementtejä (C3D8R, C3D8i, C3D20R, C3D20H) tai tetraedrielementtejä (C3D4, C3D10M).

C3D8R ja C3D20R elementit käyttävät vähennetyn integroinnin menetelmää. Elementti C3D8i on epäkonformi elementti. C3D4 on lineaarinen ja C3D10M parabolinen tetraedrielementti. Tarkempi kuvaus tässä tutkimuksessa käytetyistä elementeistä löytyy lähteestä /30/.

Kuvissa 4.2.1–1, 4.2.1–2, 4.2.1–3 ja 4.2.1–4 on piirretty eri elementtimalleja kuormittamattomassa (a) ja kuormitetussa (b) tilanteessa eri verkon tiheyksillä. Kuormitetussa tilanteessa telan kulmanopeudeksi pyörimisakselin ympäri asetettiin

$\omega = 34,5 \text{ rad/s}$. Tämän telan dimensioilla tämä vastaa paperin tuotantonopeutta 1500 m/min. Abaqus laskee pyörimisnopeuden aiheuttamat keskeivoimat tilavuusyksikköä kohden (kaava 32) ja asettaa keskeivoimat tilavuusvoimina elementeille kuten kohdassa 4.1. Mallin reunaehtoina käytettiin päätyjen jäykkää kiinnitystä. Kuormitetun tilanteen siirtymät on piirretty Abaqus-ohjelmiston automaattisen siirtymien skaalauksen mukaisessa suhteessa. Loput eri elementeillä ja elementtimäärillä lasketut siirtymän y arvot ovat piirretty kuvassa 4.2.1–5.

Johdetaan seuraavaksi Abaqus-ohjelmiston käyttämän keskeisvoiman kuormituksen termi /30/

$$\boldsymbol{\omega} = \omega \mathbf{n}, \quad (24)$$

missä ω = kulmanopeuden suuruus

\mathbf{n} = pyörimisakselin yksikkövektori.

Määritellään vektori \mathbf{B} seuraavasti

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3], \quad (25)$$

missä \mathbf{b}_i = yksikkövektori.

Tällöin

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{B} \quad (26)$$

ja

$$\frac{d^2\mathbf{B}}{dt^2} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{B} + \boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{B}}{dt}. \quad (27)$$

Kun \mathbf{x}_0 on piste pyörimisakselilla, niin materiaalin partikkelin paikka, \mathbf{x} , on

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + y^i \mathbf{b}_i, \quad (28)$$

missä $y^i, i = 1, 2, 3$, ovat pisteen koordinaatit.

Ottamalla aikaderivaatta saadaan

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{d\mathbf{x}_0}{dt} + \frac{dy^i}{dt} \mathbf{b}_i + y^i \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i. \quad (29)$$

Oletetaan, että pyörimisakselin origo, \mathbf{x}_0 , on kiinnitetty, jolloin

$$\frac{d\mathbf{x}_0}{dt} = \frac{d^2\mathbf{x}_0}{dt^2} = 0, \quad (29)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{dy^i}{dt} \mathbf{b}_i + y^i \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i, \quad (30)$$

ja
$$\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} = \frac{d^2y^i}{dt^2} \mathbf{b}_i + 2 \frac{dy^i}{dt} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i + y^i \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i) + y^i \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{b}_i. \quad (31)$$

Virtuaalisen työn osuus d'Alembertin voimista on

$$\delta W^A = - \int_{V^0} \rho^0 \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} \cdot \delta\mathbf{x} dV^0, \quad (31)$$

missä ρ^0 = mallin materiaalin tiheys,

V^0 = mallin tilavuus ja

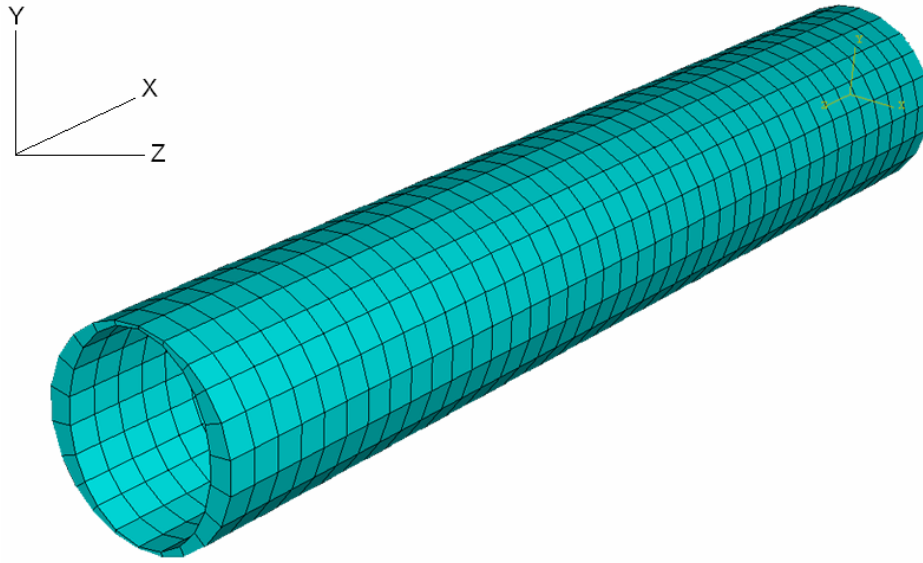
$\delta\mathbf{x}$ = virtuaalinen siirtymä

Kun merkitään $\delta\mathbf{x} = \delta y^i \mathbf{b}_i$, saadaan kaavan 31 avulla

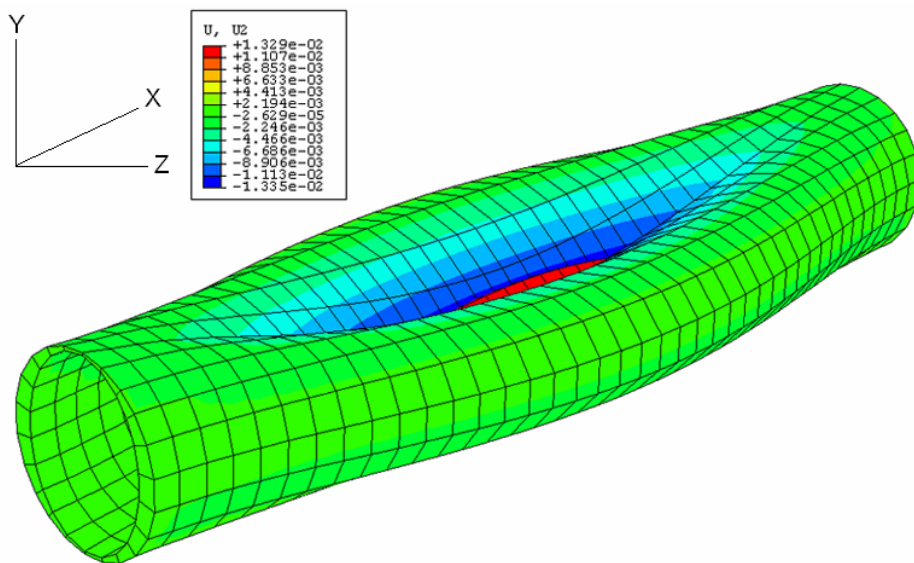
$$\delta W^B = - \int_{V^0} \rho^0 \left[\frac{d^2y^i}{dt^2} \delta y^i + \left(2 \frac{dy^i}{dt} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i + y^i \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i) + y^i \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{b}_i \right) \cdot \delta y^j \mathbf{b}_j \right] dV^0,$$

jonka kolmas termi on keskeivoiman kuormituksen termi ja voidaan esittää muodossa

$$- \int_{V^0} \rho^0 y^i \delta y^j (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{b}_i \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{b}_j - (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\omega}) \delta_{ij}) dV^0. \quad (32)$$

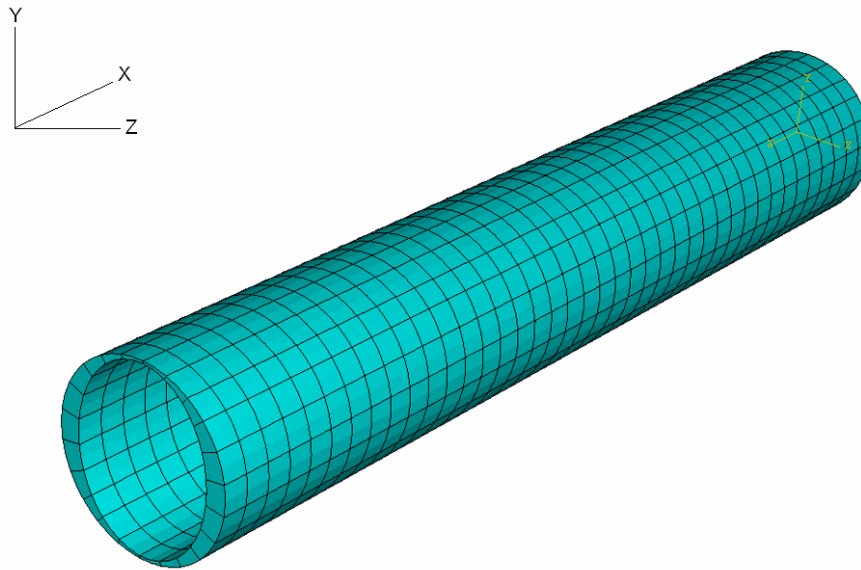


Kuva 4.2.1–1a. Telavaipan elementtimalli lineaarisilla C3D8R elementeillä kuormittamattomassa tilassa. 1804 solmua.

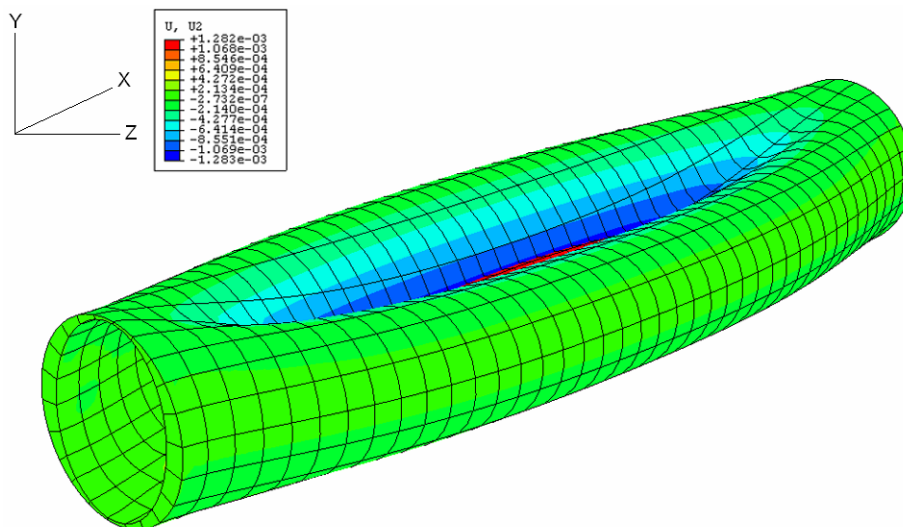


Kuva 4.2.1–1b. Siirtymät suunnassa y arvolla 1500 m/min. Siirtymän y maksimiarvo on 13,29 mm. Siirtymät ovat esitetty suhteessa 60:1.

Kuten kuvasta 4.2.1–1a huomataan, lineaariset elementit eivät kuvaa hyvin telan kaarevia muotoja. Siirtymä y -akselin positiiviseen suuntaan oli 13,29 mm ja y -akselin negatiiviseen suuntaan 13,35 mm (kuva 4.2.1–1b). Käytetyn siirtymien skaalauksen vuoksi mallin keskikohta menee vastakkaiselta puolelta läpi.

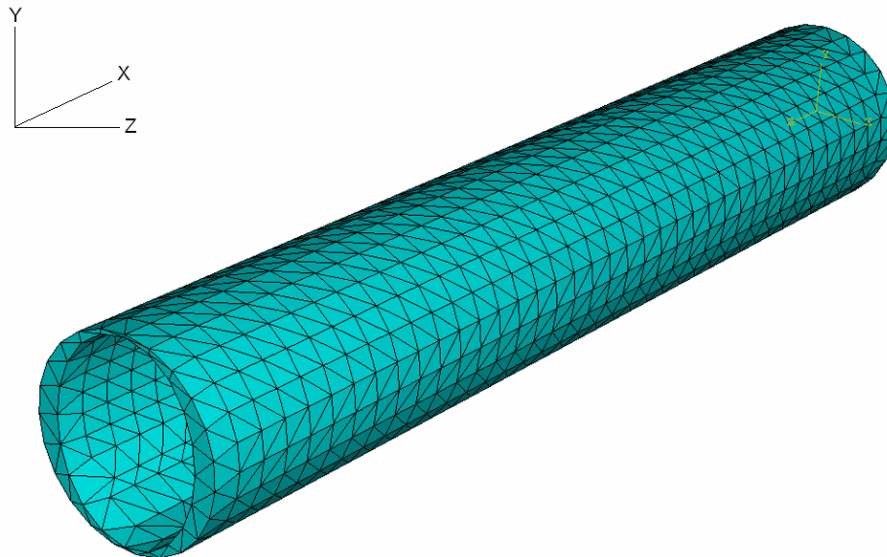


Kuva 4.2.1–2a. Telavaipan elementtimalli parabolisilla C3D20R elementeillä kuormittamattomassa tilassa. 6720 solmua.

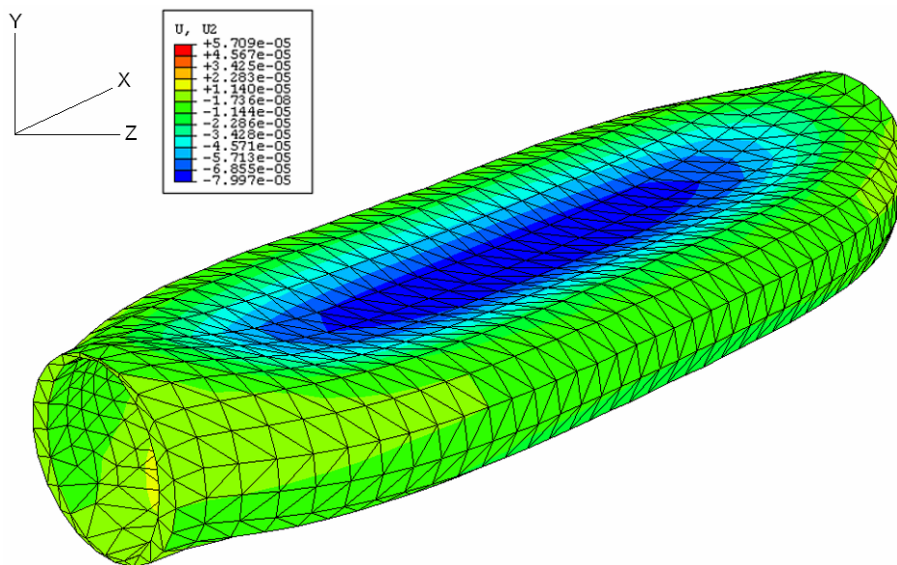


Kuva 4.2.1–2b. Siirtymät suunnassa y arvolla 1500 m/min. Siirtymän y maksimiarvo on 1,262 mm. Siirtymät ovat esitetty suhteessa 624:1.

Kuten kuvasta 4.2.1–2a huomataan, paraboliset elementit kuvaavat hyvin telan kaarevia muotoja. Siirtymän y-akselin positiiviseen suuntaan oli 1,282 mm ja y-akselin negatiiviseen suuntaan 1,283 mm (kuva 4.1.1–2b).

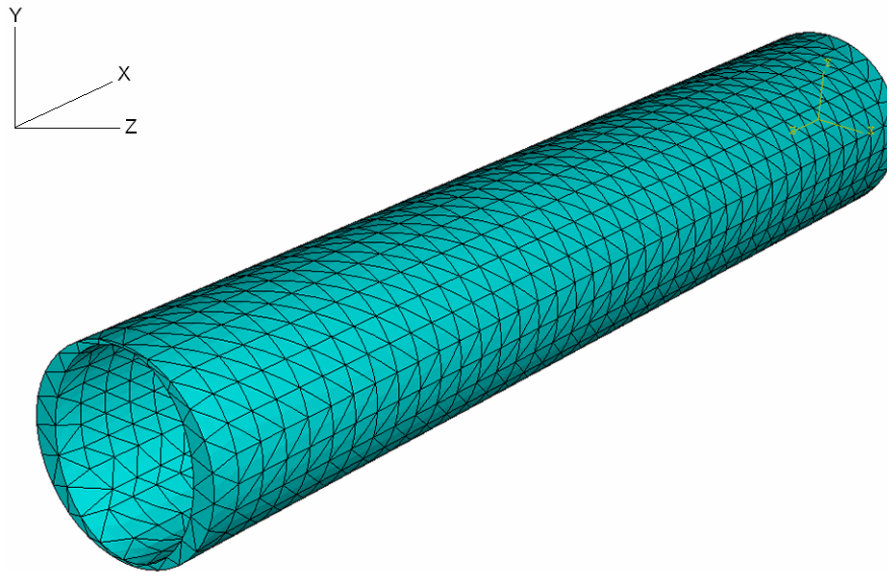


Kuva 4.2.1–3a. Telavaipan elementtimalli lineaarisilla C3D4 elementeillä kuormittamattomassa tilassa. 1870 solmua.

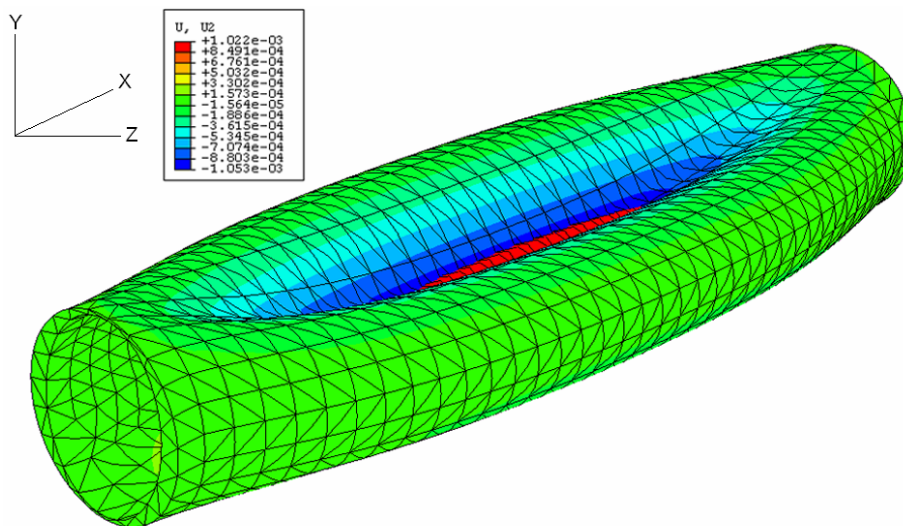


Kuva 4.2.1–3b. Siirtymät suunnassa y arvolla 1500 m/min. Siirtymän y maksimiarvo on 0,05709 mm. Siirtymät ovat esitetty suhteessa 6526:1.

Kuten kuvasta 4.2.1–3a huomataan, lineaariset tetraedrielementit eivät kuvaa hyvin telan kaarevia muotoja. Siirtymän y -akselin positiiviseen suuntaan oli 0,05709 mm ja y -akselin negatiiviseen suuntaan 0,07997 mm (kuva 4.1.1–3b).



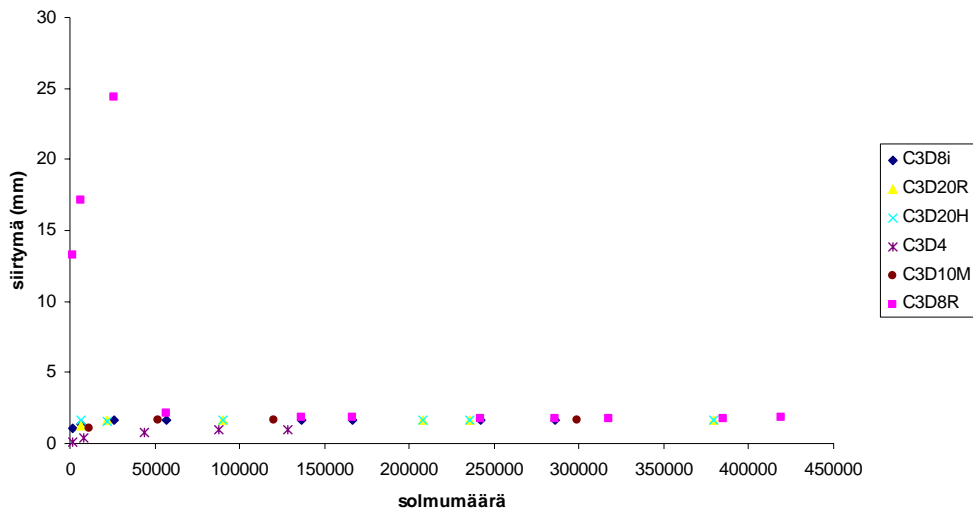
Kuva 4.2.1–4a. Telavaipan elementtimalli parabolisilla C3D10M elementeillä kuormittamattomassa tilassa. 11195 solmua.



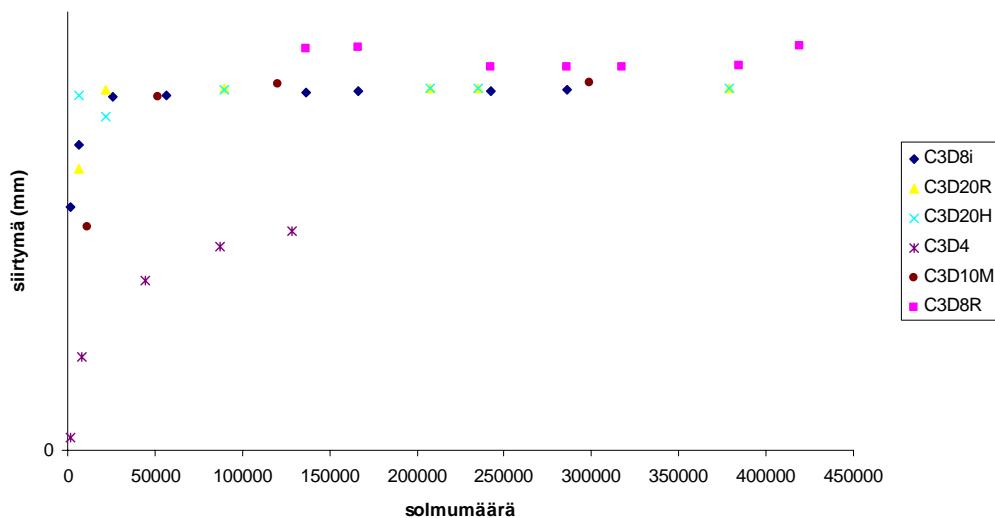
Kuva 4.2.1–4b. Siirtymät suunnassa y arvolla 1500 m/min. Siirtymän y maksimiarvo on 1,022 mm. Siirtymät ovat esitetty suhteessa 760:1.

Kuten kuvasta 4.2.1–4a huomataan, paraboliset tetraedrielementit kuvaavat hyvin telan pyöreitä muotoja. Siirtymän y-akselin positiiviseen suuntaan oli 1,022 mm ja y-akselin negatiiviseen suuntaan 1,053 mm (kuva 4.1.1–4b).

Kuvassa 4.2.1–5 on piirretty siirtymien maksimi-arvot suunnassa y solmumäärän funktiona kaikilla kuudella erilaisella elementillä. Siirtymien maksimi-arvot sijaitsivat keskellä mallia pituusakselin suunnassa. Kuvasta nähdään, että käyttämällä elementtiä C3D8R, mallin siirtymät ovat liian suuria harvalla verkolla. Tämä johtuu kyseisen elementin käyttämästä vähennetyin integroinnin menetelmästä, jolloin harvalla verkolla saadaan epätarkkoja tuloksia. Virhe poistuu käytettäessä riittävän tiheää verkkoa. Lineaariset 4-solmuiset elementit käyttäytyvät liian jäykästi. Kuvassa 4.2.1–6 on piirretty kuvan 4.2.1–5 arvot välillä 0...2 mm. Eri elementit on piirretty eri symbolein.

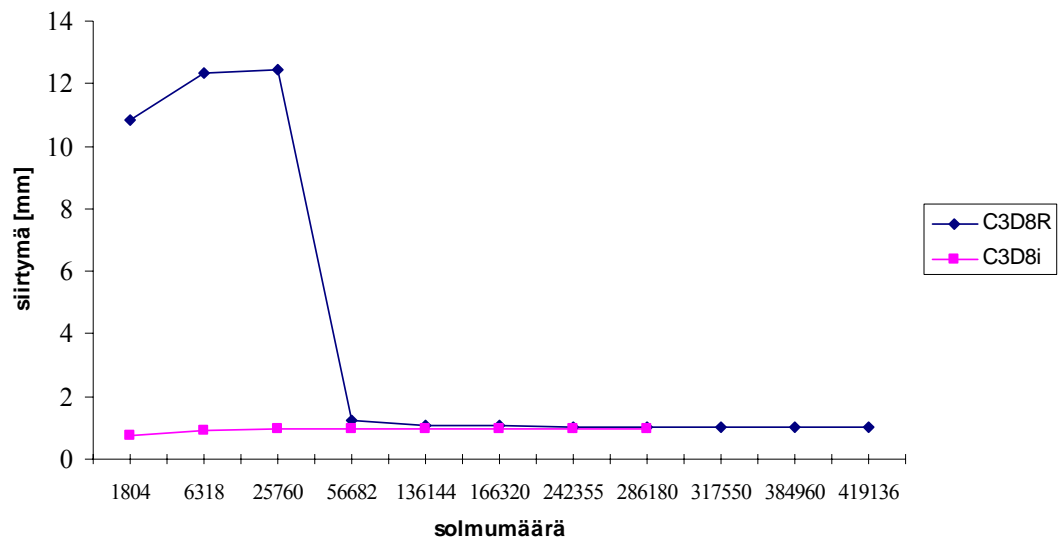


Kuva 4.2.1–5. Maksimi siirtymät suunnassa y solmumäärän funktiona.

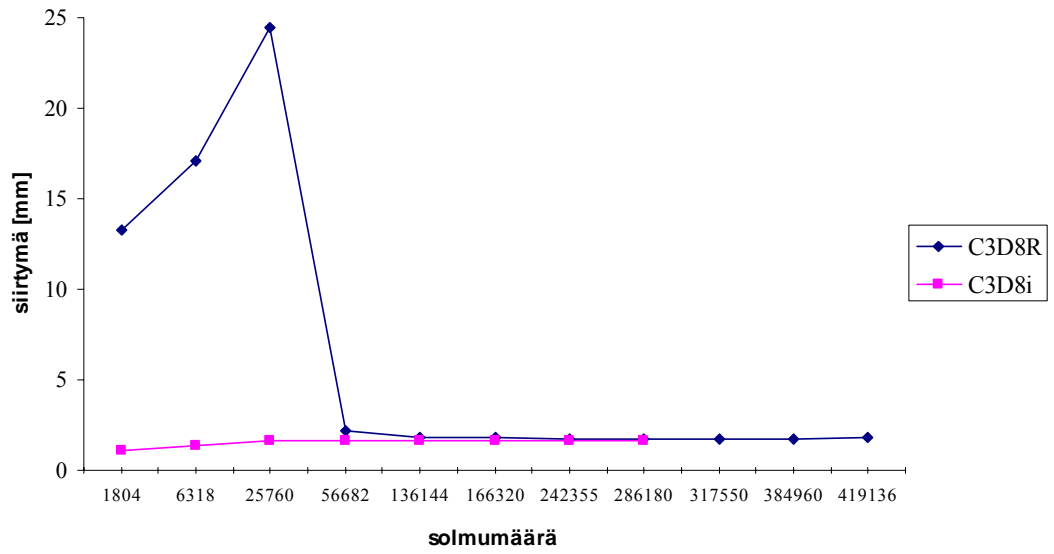


Kuva 4.2.1–6. Maksimisiirtymät suunnassa y rajattuna välille 0...2 mm.

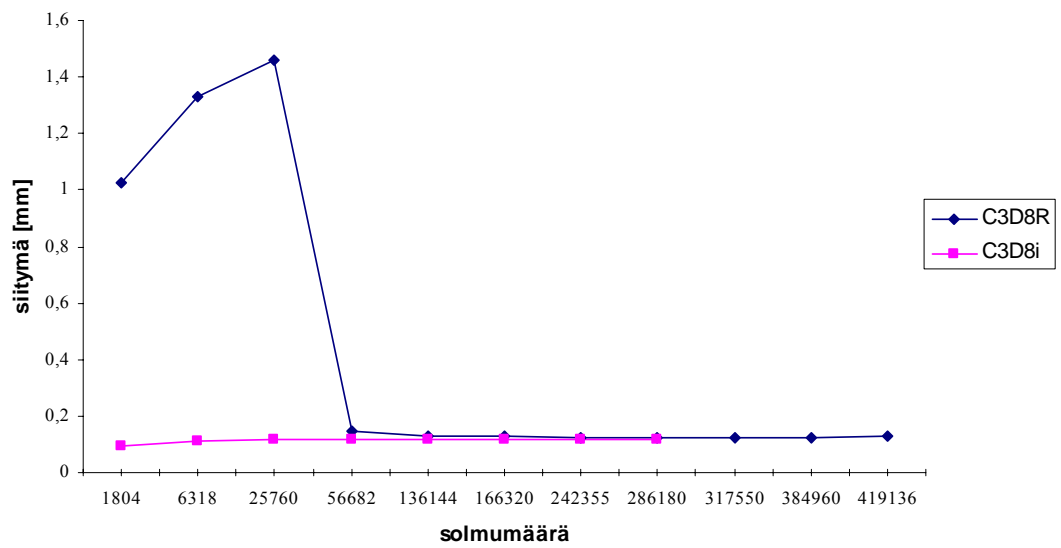
Kuvassa 4.2.1–7 on piirretty hyväksi havaitun 8-solmuisen elementin antamat siirtymän z maksimi-arvot solmumäärän funktiona kahdella eri laskentatyypillä. Siirtymien maksimi-arvot ajoittuivat keskellä mallia pituusakselin suunnassa. Elementti C3D8i käyttää täyttä integrointia ja C3D8R vähennettyä integrointia. Kuvassa 4.2.1–8 ja 4.2.1–9 on piirretty vastaavasti siirtymät suunnassa y ja x . Noin 60 000 solmupisteen kohdalla Abaquksen verkottaja teki paksuussuunnassa toisen kerroksen elementtejä. Kuvista nähdään, että vasta noin 60 000 solmupisteen kohdalla saadaan hyviä tuloksia vähennettyä integrointia käyttävällä elementillä. Tämä johtuu siitä, että C3D8R elementillä on harvaa verkkoa käytettäessä liian vähän integrointipisteitä, jotta tuloksesta saataisiin riittävän tarkka yhdellä elementtikerroksella vaipan paksuussuunnassa. Sama ilmiö havaitaan kuvista 4.2.1–8 ja 4.2.1–9.



Kuva 4.2.1–7. Maksimisiirtymät suunnassa z solmumäärän funktiona.



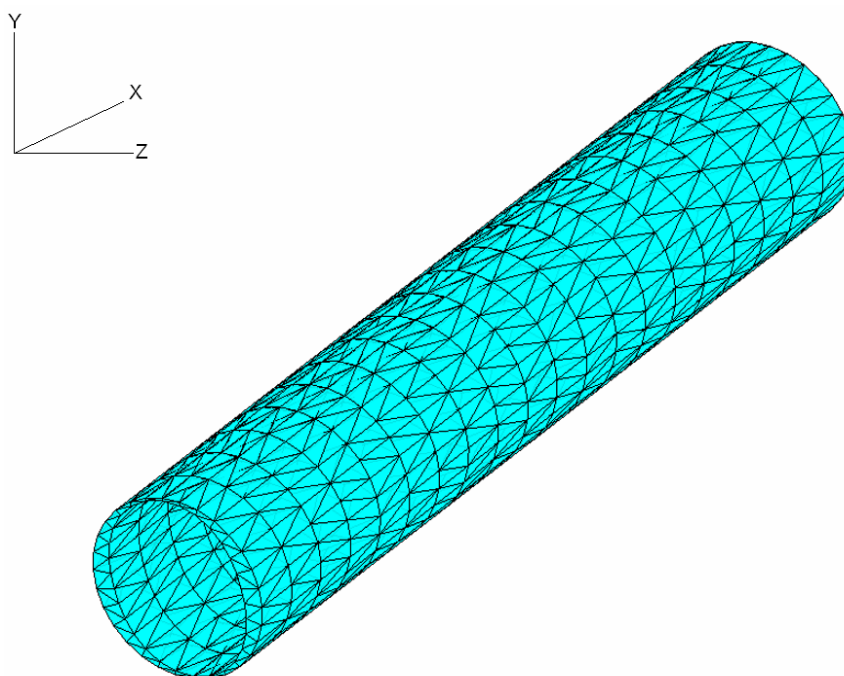
Kuva 4.2.1–8. Maksimisiirtymät suunnassa y solmumäärän funktiona.



Kuva 4.2.1–9. Maksimisiirtymät suunnassa x solmumäärän funktiona.

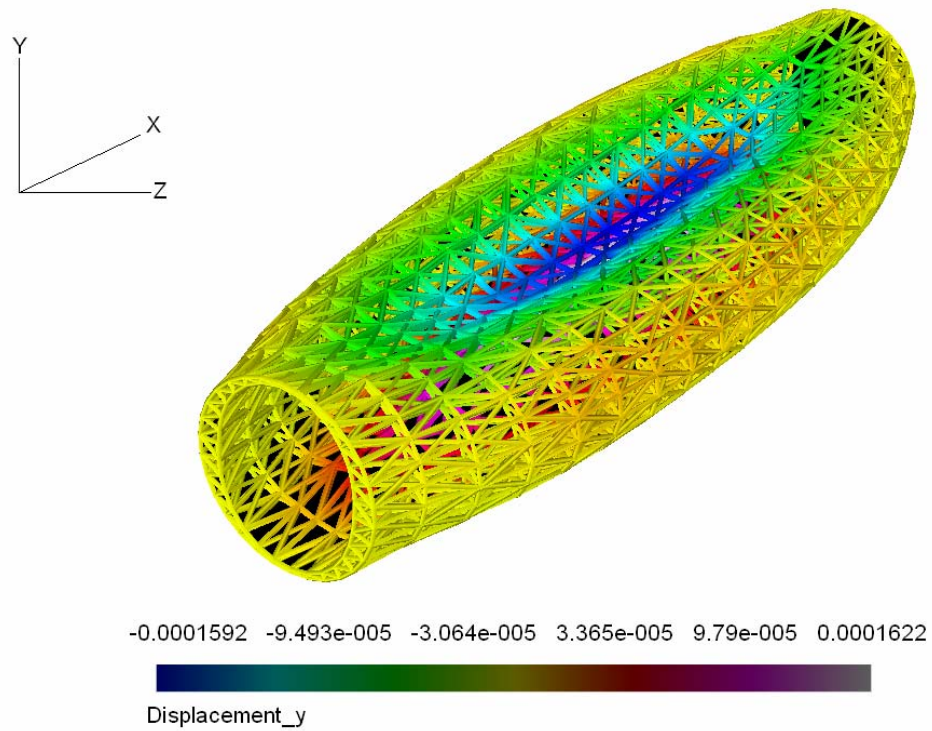
4.2.2 Elmer

Telan vaippa mallinnettiin tilavuudeksi, joka jaettiin pienempiin osiin käyttämällä kahdenlaisia tetraedrielementtejä. Toiset olivat lineaarisia 4-solmuisia ja toiset parabolisia 10 solmuisia. Kuvassa 4.2.2–1a on piirretty elementtimalli staattisessa tilanteessa. Kuvissa 4.2.2–1b ja c on piirretty elementtimalli dynaamisessa tilanteessa 4-solmuisella ja 10-solmuisella tetraedrielementillä. Dynaamisessa tilanteessa telan keskeisvoimaksi asetettiin 6772 kN/m^3 . Tämä vastaa paperikoneen tuotantonopeutta 1500 m/min .

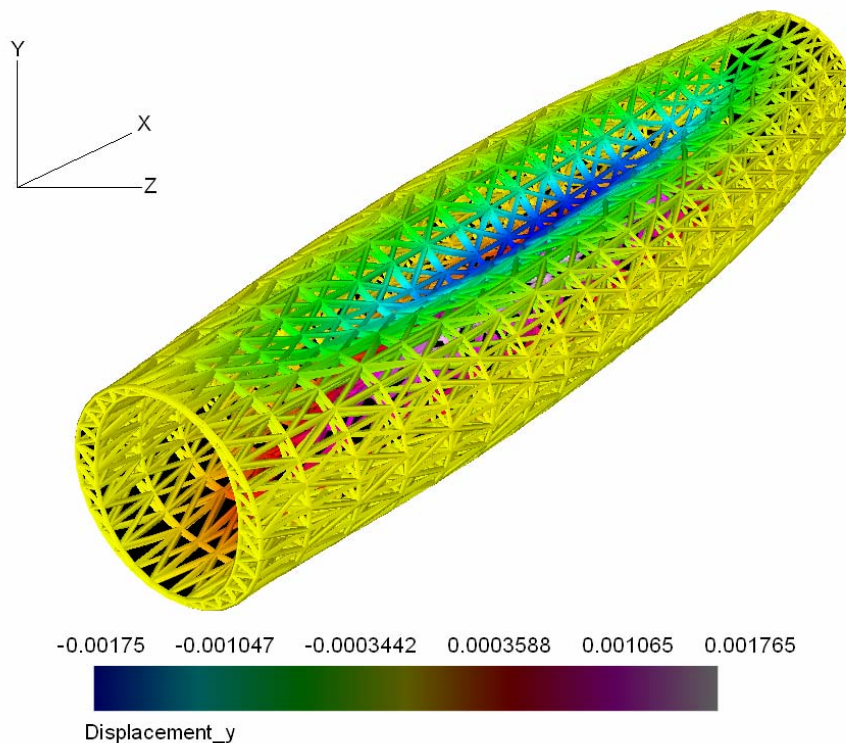


Kuva 4.2.2–1a. Telavaipan elementtimalli lineaarisilla 4-solmuisilla elementeillä staattisessa tilassa. 3720 elementtiä.

Kuvien 4.2.2–1b ja c siirtymät on esitetty samassa suhteessa kuin edellisen kappaleen vastaavat Abaqus-mallit. Loput siirtymän y arvot eri elementeillä ja elementtimäärillä on piirretty kuvissa 4.2.2–3 ja 4.2.2–4. Kuvasta 4.2.2–1b havaitaan siirtymän y maksimiarvon olevan lineaarisilla elementeillä noin $0,162 \text{ mm}$ minimiarvon ollessa noin $-0,159 \text{ mm}$. Kuvasta 4.2.2–1c havaitaan siirtymän y maksimiarvon olevan lineaarisilla elementeillä noin $1,76 \text{ mm}$ minimiarvon ollessa $-1,75 \text{ mm}$.

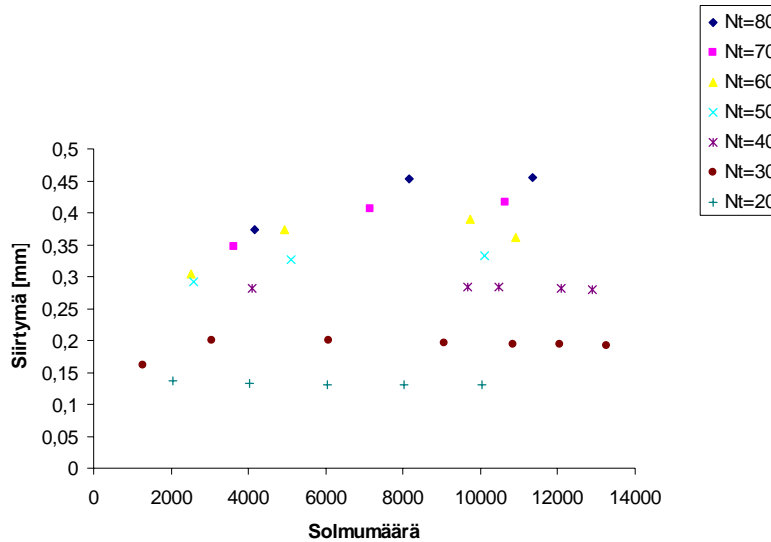


Kuva 4.2.2–1b. Siirtymät suunnassa y lineaarisilla 4-solmuisilla tetraedrielementeillä arvolla 1500 m/min. 1260 solmua. Siirtymän y maksimiarvo on 0,162 mm. Siirtymät ovat esitetty suhteessa 4000:1.

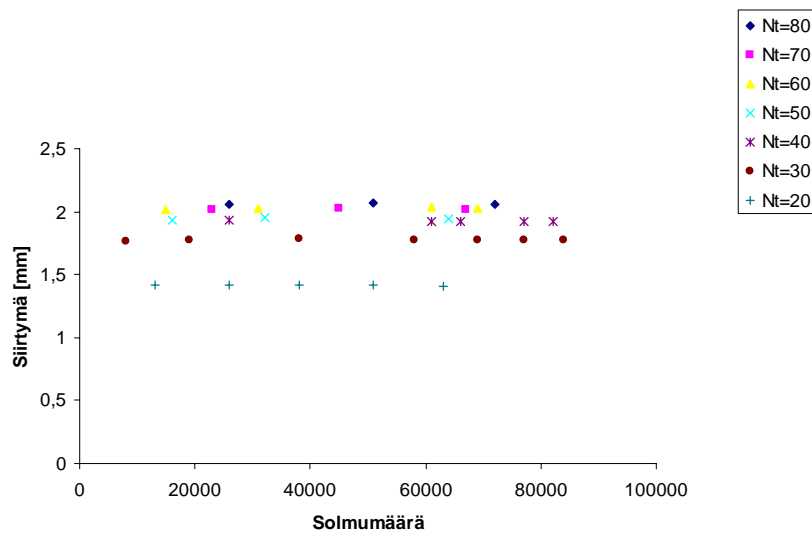


Kuva 4.2.2–1c. Siirtymät suunnassa y parabolisilla 10-solmuisilla tetraedri-elementeillä arvolla 1500 m/min. 7820 solmua. Siirtymän y maksimiarvo on 1,765 mm. Siirtymät ovat esitetty suhteessa 300:1.

Kuvassa 4.2.2–3 on piirretty siirtymät suunnassa y solmumäärän funktiona 4-solmuisella elementillä. Kuvassa 4.2.2–4 on piirretty siirtymät suunnassa y solmumäärän funktiona 10-solmuisella elementillä. Siirtymien maksimiarvot sijaitsivat keskellä mallia pituusakselin suunnassa. Eri kehänsuuntaiset elementtijaot N_t ovat kuvissa piirretty eri symbolein.



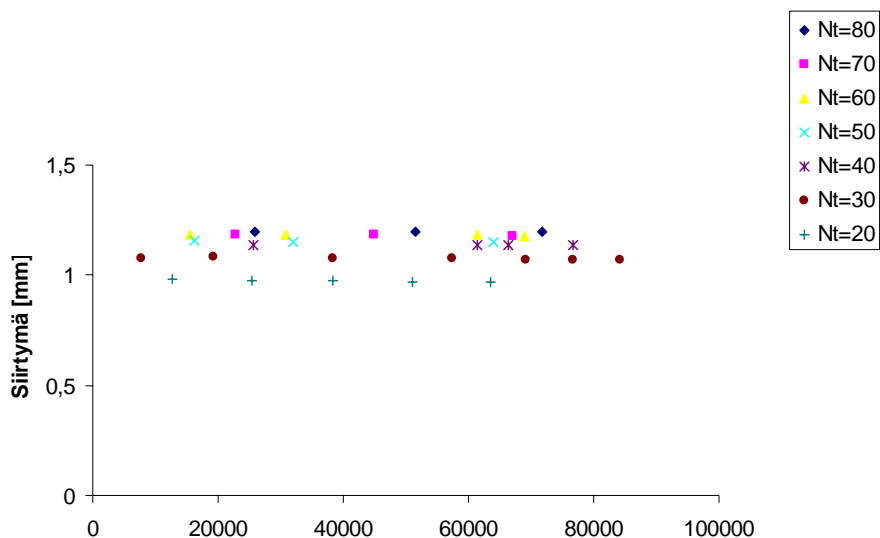
Kuva 4.2.2–3. Maksimisiirtymät suunnassa y solmumäärän funktiona arvolla 1500 m/min 4-solmuisilla lineaarisilla tetraedrielementeillä.



Kuva 4.2.2–4. Maksimisiirtymät suunnassa y solmumäärän funktiona arvolla 1500 m/min 10-solmuisilla parabolisilla tetraedrielementeillä.

Kuvasta 4.2.2–3 havaitaan, että lineaariset tetraedrielementit käyttäytyvät merkittävästi jäykemmin kuin paraboliset elementit. Lineaarisilla elementeillä maksimisiirtymä jää y -suunnassa kaikilla elementtijaolla alle 0,5 mm. Kuvasta 4.2.2–4 nähdään, että parabolisilla elementeillä siirtymät ovat noin 3-4 kertaa suurempia kuin lineaarilla elementeillä lasketut siirtymät. Esimerkiksi noin 9000 lineaarisella elementillä saadaan siirtymän arvoksi noin 0,2 mm, kun elementtien määrä kehän suunnassa on 30. Vastaavasti 9000 parabolisetraattisella elementillä saadaan siirtymän arvoksi noin 1,75 mm, kun elementtien määrä kehän suunnassa on 30. Lineaarisilla elementeillä lasketut tulokset vaihtelevat välillä 0,14...0,45 mm riippuen elementtien määrästä akselin suunnassa. Suurin siirtymä oli siis noin 220 % suurempi kuin pienin siirtymä. Vastaavasti parabolisilla elementeillä lasketut tulokset vaihtelivat välillä 1,4...2,1 mm. Suurin siirtymä oli tällöin noin 41 % suurempi kuin pienin siirtymä. Tuloksien hajonta oli merkittävästi pienempää käyttäessä parabolisia elementtejä.

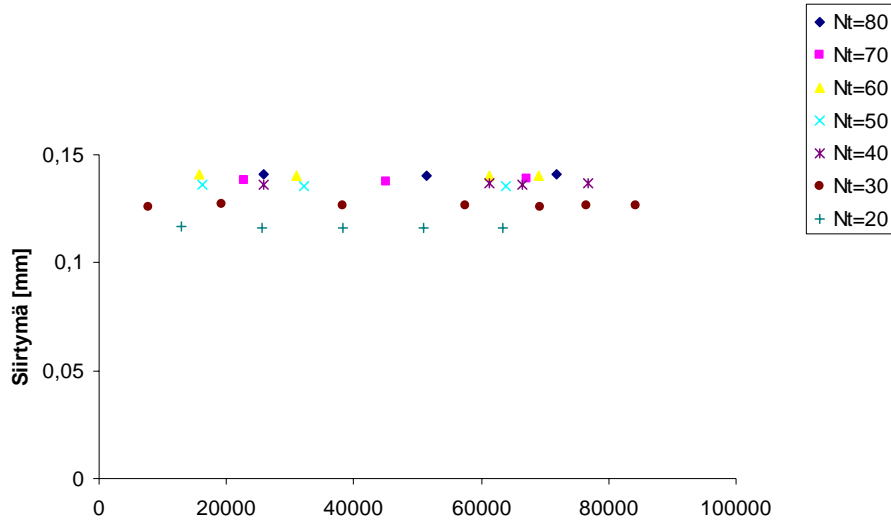
Kuvissa 4.2.2–5 ja 4.2.2–6 on piirretty hyväksi havaitun 10-solmuisen elementin antamat z - ja x -siirtymien maksimi-arvot solmumäärän funktiona. Siirtymien maksimi-arvot sijaitsivat keskellä mallia pituusakselin suunnassa. Eri kehäsuuntaiset elementtijaot N_t on kuvissa piirretty eri symbolein.



Kuva 4.2.2–5. Maksimisiirtymät suunnassa z solmumäärän funktiona arvolla 1500 m/min 10-solmuisilla parabolisilla tetraelementeillä.

Kuvasta 4.2.2–5 havaitaan, että telan akselin suuntaisella elementtimäärällä ei ole havaittavaa merkitystä z -suuntaisiin siirtymiin. Z -suunnan siirtymä on noin 0,95 mm,

kun kehän suunnassa käytetään 20 elementtiä. Z-suunnan siirtymät kasvavat, kun elementtejä lisätään kehän suunnassa. Siirtymät ovat noin 1,2 mm eli noin 25 % suurempia, kun kehän suunnassa käytetään yli 60 elementtiä.



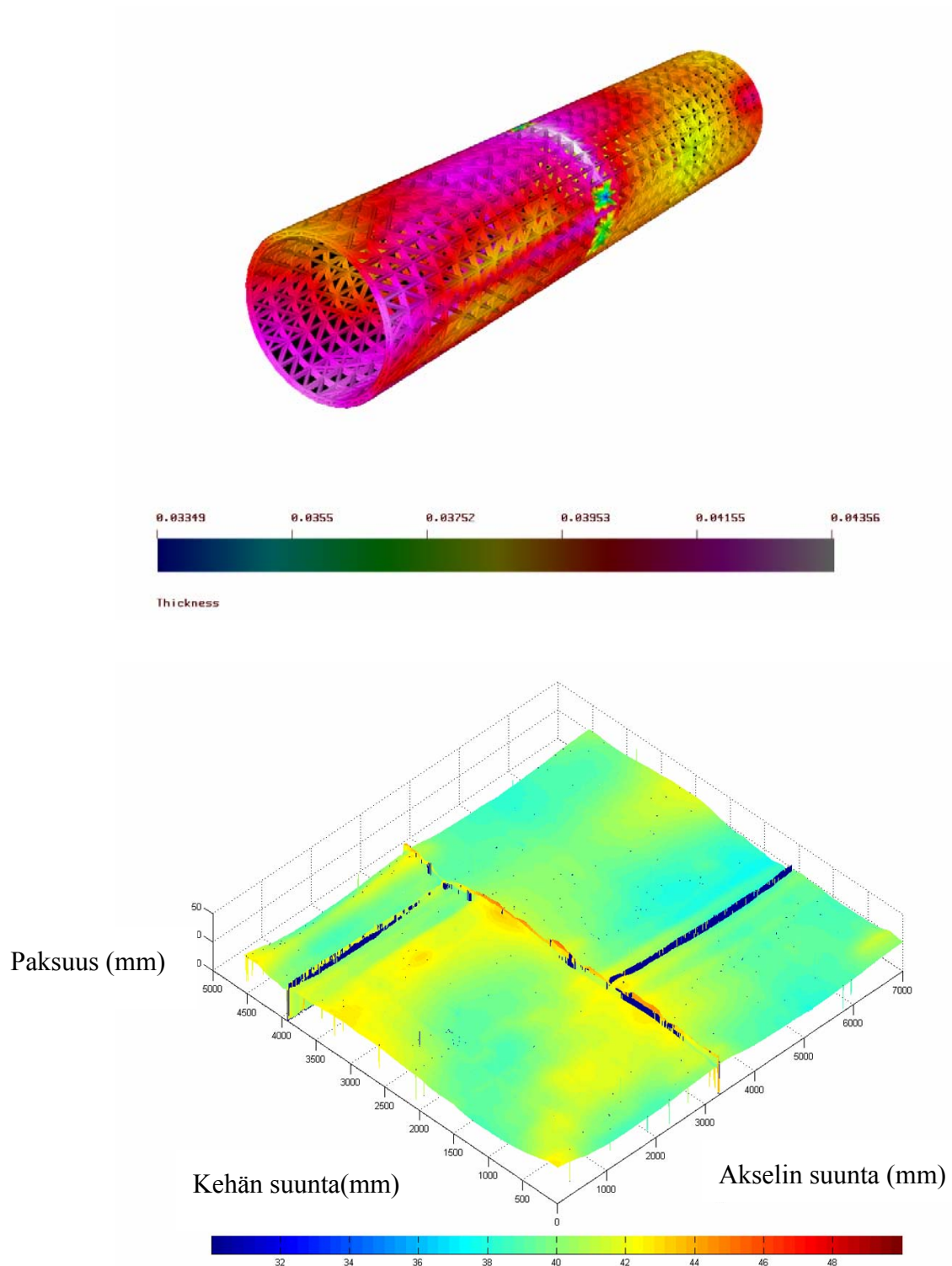
Kuva 4.2.2–6. Maksimisiirtymät suunnassa x solmumäärän funktiona arvolla 1500 m/min 10-solmuisilla parabolisilla tetraelementeillä.

Kuvista 4.2.2–6 havaitaan, että x -suunnassa siirtymät ovat noin 10 % y - ja z -suuntaisista siirtymistä. X -suunnassa siirtymien riippuvuus elementtijaosta on vastaavanlainen kuin z -suunnassakin. Pienimmät x -siirtymät ovat noin 0,12 mm, kun taas suurimmat x -siirtymät ovat noin 0,14 mm eli noin 17 % suurempia.

4.3 Seinämänpaksuus

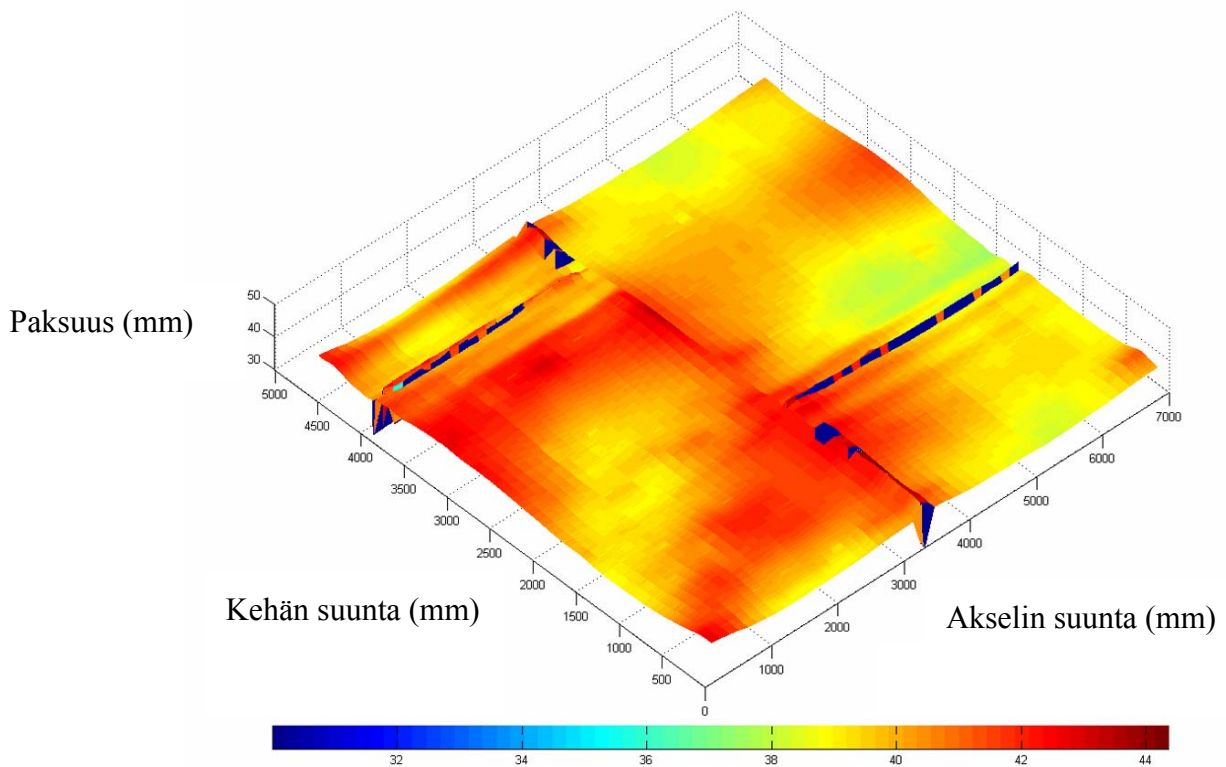
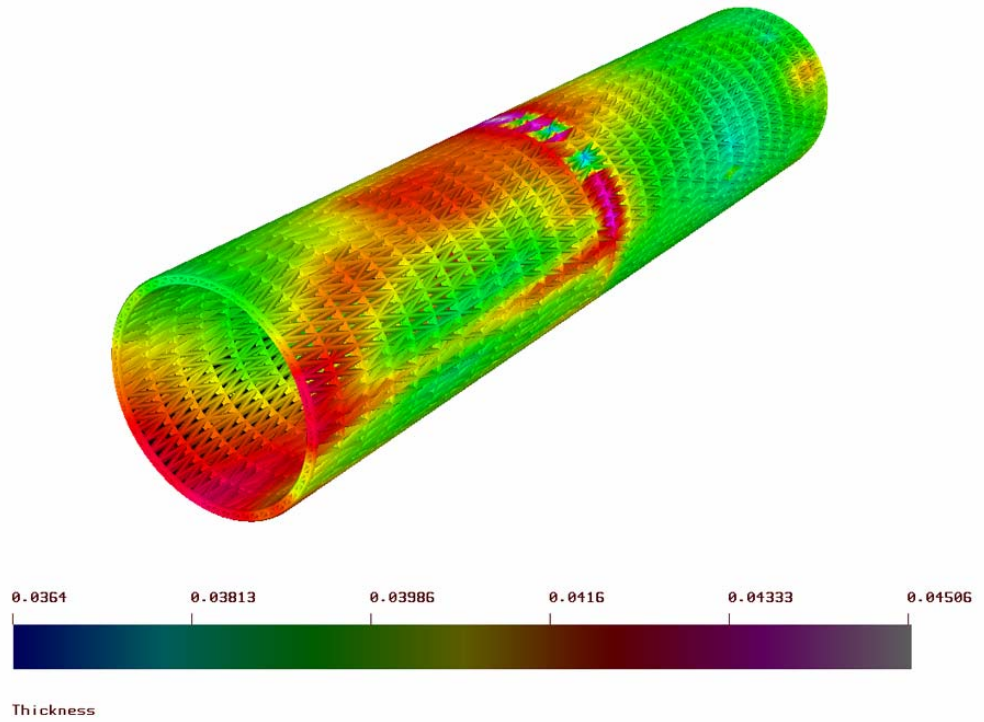
Koetelan seinämänpaksuus mitattiin telasorvissa spiraalimittauksena. Mittausmatriisissa aina yhden kierroksen tuloksille annettiin sama pituuskoordinaatti. Seinämänpaksuus mitattiin kahdella eri nousulla. Nousulla 10 mm/kierros saatiin noin 720 000 mittauspistettä. Mittausmatriisin koko oli tällöin 1024×690 . Nousulla 140 mm/kierros saatiin noin 50 000 mittauspistettä. Mittausmatriisin koko oli tällöin 1024×49 . Kuvassa 4.3–1 on esitetty telamallin seinämänpaksuusvaihtelut harvemmillä 1024×49 mittausmatriisilla. Lisäksi kuvassa on levityskuva mittausmatriisista. Kuvassa 4.3–2 on esitetty vastaavat kuvat tiheämmällä 1024×690 mittausmatriisilla. Kuorimuodonmuutosten laskennassa käytettiin tiheämpää 1024×690 mittausmatriisia.

Kuvista 4.3–1 ja 4.3–2 erottuvat selvästi koetelan yksi akselin suuntainen ja kaksi poikittaissuuntaista hitsisaumaa.



Kuva 4.3–1. Telavaipan seinämänpaksuus telamallissa ja levityskuvana 1024×49 mittausmatriisilla.

Kuvasta 4.3–1 havaitaan, että vaihteluväli ilman hitsisaumaa on noin 37...43 mm. Suurin arvo on noin 44 mm ja pienin arvo noin 30 mm.



Kuva 4.3–2. Telavaipan seinämäpaksuus telamallissa ja levityskuvana 1024×690 mittaasmatriisilla.

Kuvasta 4.3–2 havaitaan, että vaihteluväli ilman hitsisaumaa on noin 37...43 mm. Suurin arvo on noin 45 mm ja pienin arvo noin 30 mm.

4.4 Poikkileikkausten kuorimuodonmuutokset

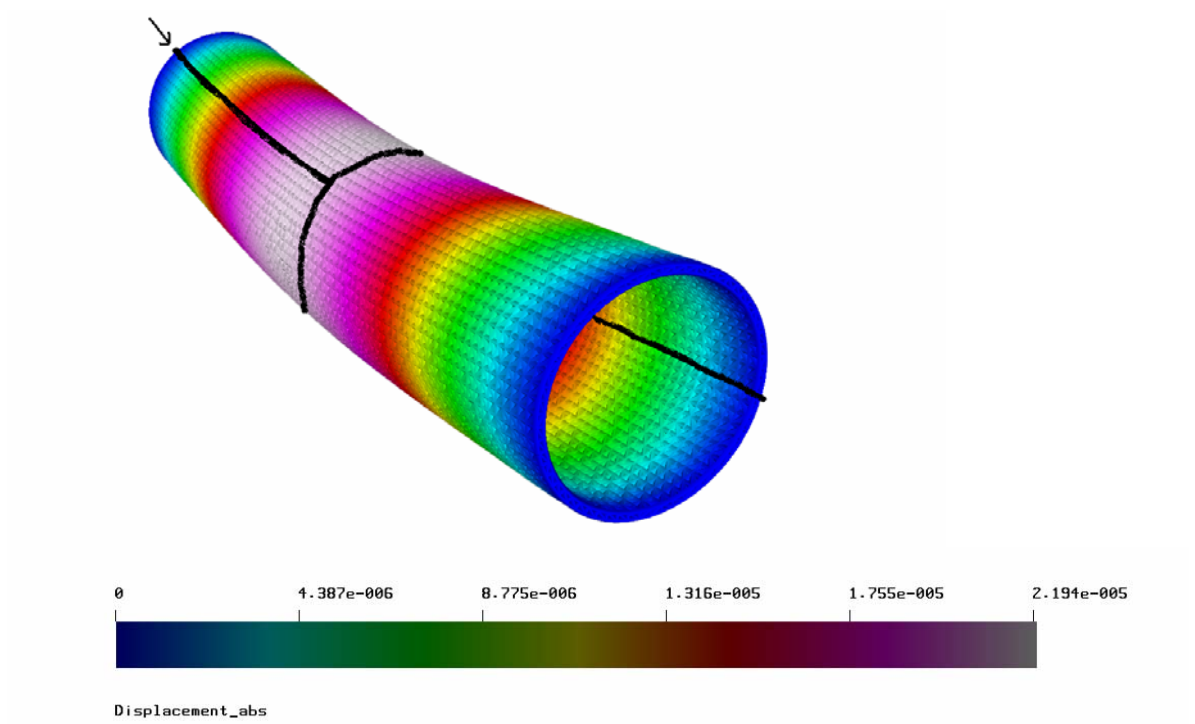
Poikkileikkausten kuorimuodonmuutokset laskettiin viidellä eri pyörimisnopeudella kolmesta eri poikkileikkauksesta. Suurin pyörimisnopeus on valittu paperikoneen tyypillisen tuotantonopeuden mukaan. Jokaisella pyörimisnopeudella laskettiin siirtymäkenttä sekä kolmen poikkileikkauksen geometriavirhe. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan siirtymiä, jotka ovat vertailukelpoisia kokeellisten mittaustulosten kanssa.

Seinämänpaksuusvaihtelut ovat mallissa sitä realistisemmat, mitä tarkempi elementtiverkko rakennetaan. Mallinnuksissa huomattiin, että näillä mallin dimensioilla elementtejä täytyy olla vähintään 30 kehän suunnassa, jotta malli ei käyttäytyisi liian jäykästi. Myös Kinnunen /29/ oli päätenyt käyttämään diplomityössään 32 kehän suuntaista elementtiä. Elementtityyppi vaikuttaa siihen, kuinka tarkasti seinämänpaksuusvaihtelut tulevat kuvatuiksi. Noin 40000 parabolista elementtiä riittävät antamaan hyviä tuloksia. Linearisia 4-solmuisia elementtejä ei tule käyttää. Verifioinnin perusteella 4-solmuiset lineaariset tetraedrielementit käyttäytyvät liian jäykästi. Tämän vuoksi kuorimuodonmuutoksia laskettaessa käytettiin 10-solmuisia parabolisia tetraedrielementtejä.

Kappaleen 4.2 perusteella Elmer-ohjelmistolla lasketut tulokset ovat lähellä Abaqus-ohjelmistolla laskettuja tuloksia, kun kehän suunnassa on 30 elementtiä. Akselin suuntaisella elementtimäärällä ei ole suurta vaikutusta tuloksiin. 10-solmuisilla parabolisilla tetraedrielementeillä valittiin kehän suunnassa elementtimääräksi 60 ja akselin suunnassa 90. Näillä arvoilla elementtejä tuli 32641 kpl ja solmuja 65161 kpl. Mallin (telavaippa) massa oli 9800 kg ja tilavuus $1,25 \text{ m}^3$ käytettäessä rakenneteräksen materiaaliarvoja. Massa voi vaihdella noin 1...3 % käytetyn verkon tiheyden mukaan, sillä tiheä verkko kuvaa mitatun koetelan seinämänpaksuusvaihteluita tarkemmin kuin harva verkko.

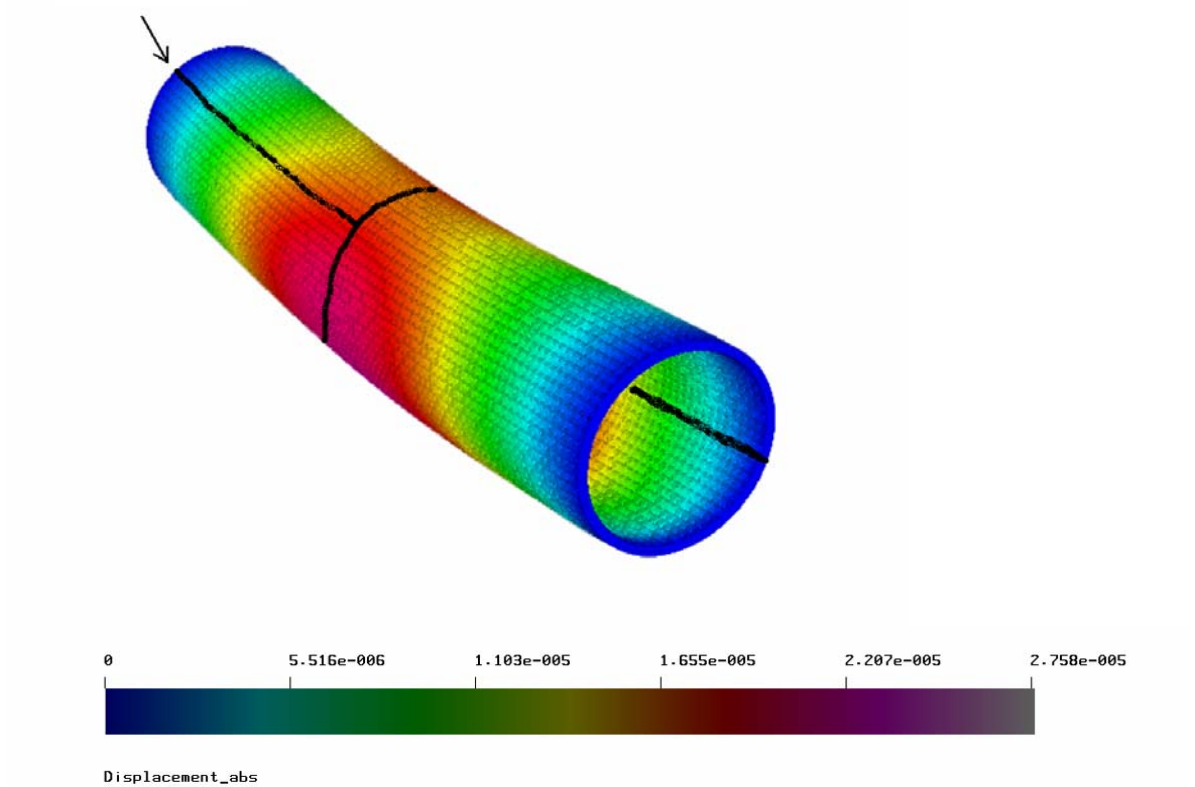
Telan siirtymien itseisarvo piirrettiin nopeuksilla 50 m/min, 400 m/min, 800 m/min, 1200 m/min ja 1600 m/min (Kuvat 4.4-1, 4.4-2, 4.4-3, 4.4-4 ja 4.4-5). Elmer-ohjelmistoon asetettiin vastaaviksi keskeisvoiman arvoiksi 7519 N/m^3 , 481226 N/m^3 , 1924904 N/m^3 , 4331034 N/m^3 , 4699617 N/m^3 . Keskeisvoiman lisäksi mallissa otettiin huomioon myös putoamiskiihtyvyyks $9,82 \text{ m/s}^2$ kappaleen 4.1 mukaisesti. Hitsisaumat on merkitty kuviin viivalla.

Hitsisauma

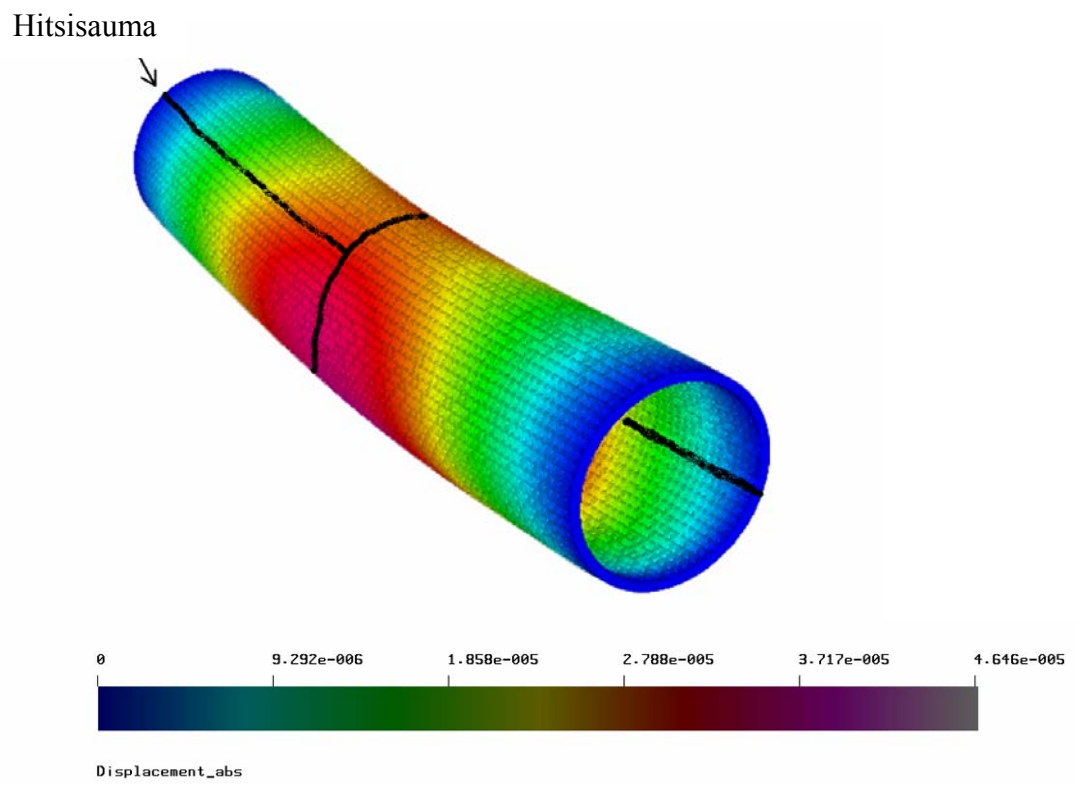


Kuva 4.4–1. Siirtymäkenttä nopeudella 50 m/min.

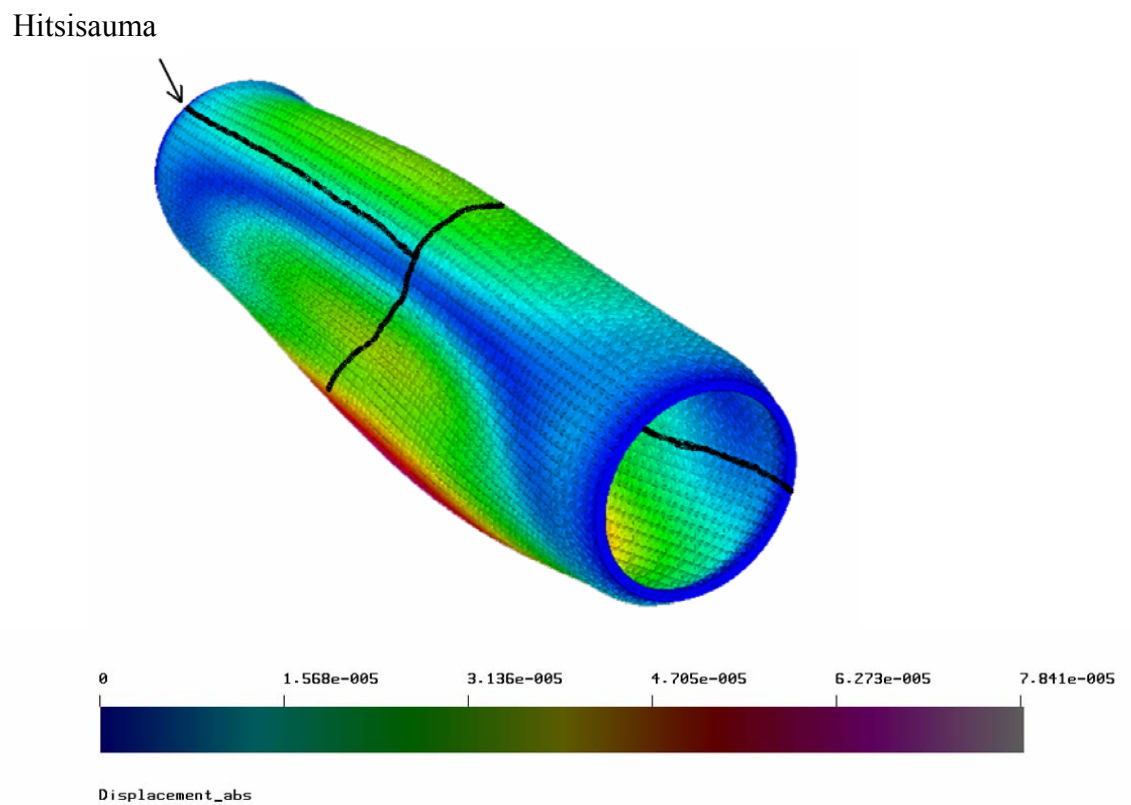
Hitsisauma



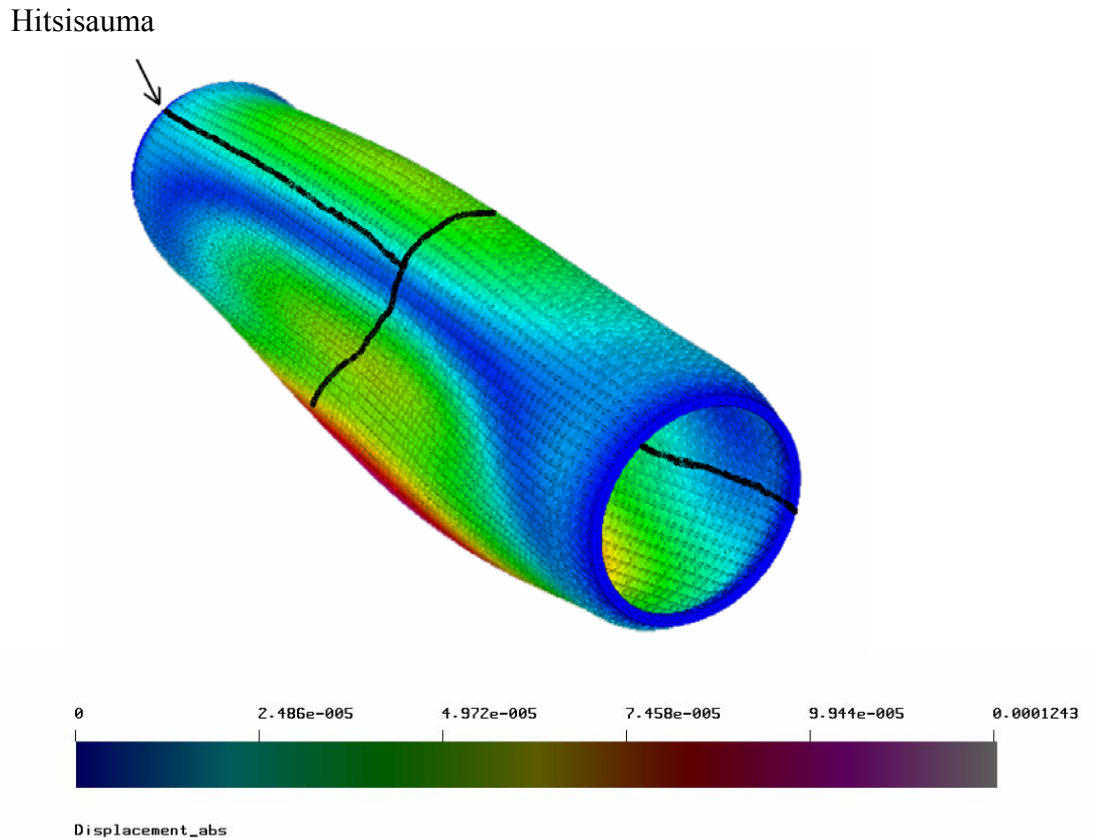
Kuva 4.4–2. Siirtymäkenttä nopeudella 400 m/min.



Kuva 4.4–3. Siirtymäkenttä nopeudella 800 m/min.



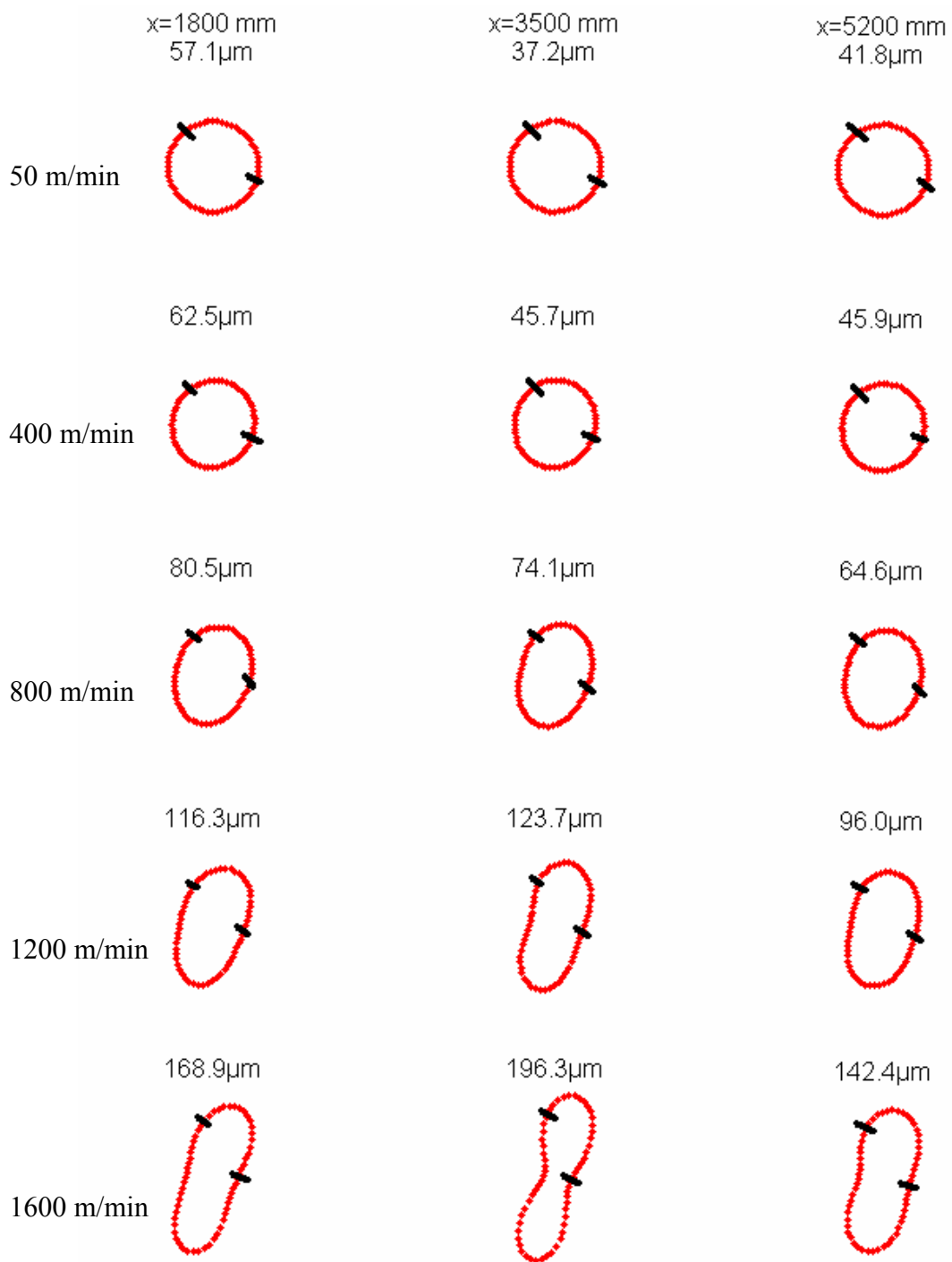
Kuva 4.4–4. Siirtymäkenttä nopeudella 1200 m/min.



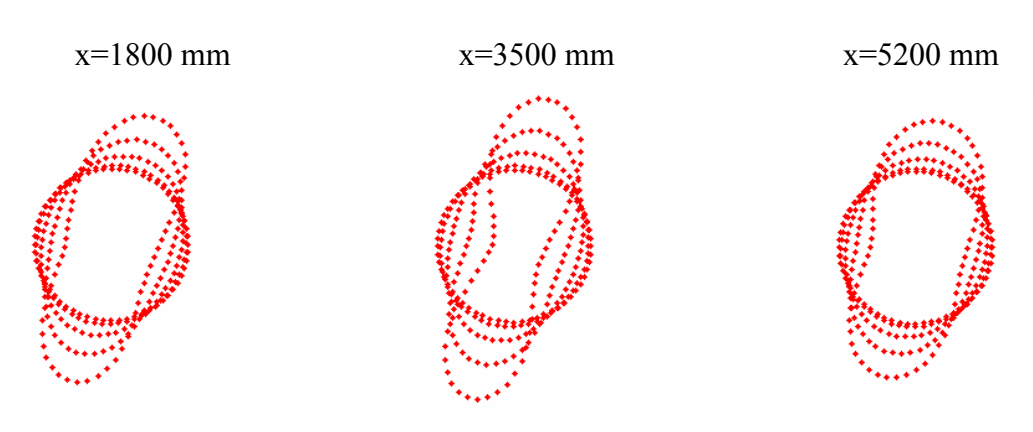
Kuva 4.4–5. Siirtymäkenttä nopeudella 1600 m/min.

Maksimisiirtymä on noin 0,022 mm pyörimisnopeudella 50 m/min (kuva 4.4–1), 0,028 mm pyörimisnopeudella 400 m/min (kuva 4.4–2), 0,046 mm pyörimisnopeudella 800 m/min (kuva 4.4–3), 0,078 mm pyörimisnopeudella 1200 m/min (kuva 4.4–4) ja 0,124 mm pyörimisnopeudella 1600 m/min (kuva 4.4–5).

Kaikilla nopeuksilla piirrettiin poikkileikkauskuvat kohdista $x = 1,8$ m, $x = 3,5$ m ja $x = 5,2$ m (Kuva 4.4–6). Päätyjen poikkileikkaukset ovat aina täysin ympyrämäisiä, koska päädyt on kiinnitetty jäykästi, joten päätyjen poikkileikkauksia ei piirretty. Kuvaan 4.4–7 on piirretty poikkileikkauskuvat kohdista $x = 1,8$ m, $x = 3,5$ m ja $x = 5,2$ m kiihdytettäessä telaa nopeudesta 50 m/min nopeuteen 1600 m/min. Geometriamuutokset on esitetty suhteessa 10 000:1. Hitsisaumat on merkitty kuviin viivalla.



Kuva 4.4–6. Pokkileikkauskuvat ja poikkileikkausten geometriavirheet nopeudella 50, 400, 800, 1200 ja 1600 m/min.



Kuva 4.6–7. Poikkileikkausgeometrian muutos kiihdyttäessä telaa nopeudesta 50 m/min nopeuteen 1600 m/min.

5 TULOSTEN ARVOINTI

5.1 Verifiointi

Seinämänpaksuusvaihteluiden mallintamiseen vaikuttavat käytetty elementtimalli ja elementtimäärä. Kuten kuvista 4.2.1–1a ja 4.2.1–2a huomataan, käytettäessä harvaa verkkoa paraboliset elementit kuvaavat telan kaarevia muotoja huomattavasti tarkemmin kuin lineaariset elementit. Sama ilmiö nähdään kuvista 4.2.1–3a ja 4.2.1–4a.

Tuloksista huomattiin, että kehän suuntainen elementtijako vaikuttaa tuloksiin enemmän kuin pituussuuntainen elementtijako. Kuvan 4.2.2–4 Elmerillä lasketuista tuloksista nähdään, että paraboliset tetraedrielementit antoivat tämän tutkimuksen telan dimensioilla hyviä tuloksia, kun kehän suunnassa on vähintään 30 elementtiä. Akselin suunnassa riitti noin 20 elementtiä.

Verifiointia vaikeutti syntyvien elementtien määrä vaipan paksuussuunnassa. Abaqus-ohjelmisto lisäsi elementtejä myös paksuussuunnassa tihennettäessä elementtiverkkoa. Abaqus-mallin elementtimäärät paksuussuunnassa vaihtelivat yhdestä neljään, riippuen käytetystä verkon tiheydestä. Malli käyttäytyi hyvin lineaarisilla elementeillä, kun paksuussuunnassa on useampia elementtejä. Tämän vuoksi Abaqus-mallit käyttäytyivät hyvin lineaarisilla särmiöelementeillä, kun elementtiverkko oli riittävän tiheä. Elmer-malliin ei ollut ohjelmallisesti mahdollista asettaa paksuussuunnassa useampia elementtejä. Tämän vuoksi Elmer-ohjelmistolla laskettaessa oli käytettävä parabolisia elementtejä.

Kun valittiin sopivat elementit ja sopiva elementtimäärä, kutistui Abaqus- ja Elmer-mallien tulosten ero pieneksi. Kuvan 4.2.2–1b siirtymän y maksimiarvo oli 0,1622 mm. Vastaavan Abaqus-mallin (Kuva 4.1.1–3b) siirtymän y maksimiarvo oli 0,05709 mm. Elmer-mallin siirtymä on siis noin 184 % suurempi kuin Abaqus-mallin siirtymä. Ero pienenee käytettäessä parabolisia tetraedrielementtejä. Kuvan 4.2.2–1c siirtymän y maksimiarvo oli 1,765 mm. Mallissa oli 3720 elementtiä, jolloin syntyi 7820 solmupistettä. Yhtä tiheän Abaqus-mallin

(kuva 4.2.1–4b) siirtymän y maksimiarvo oli 1,022 mm. Tällöin Elmer-mallin siirtymä on noin 73 % Abaqus-mallin siirtymää suurempi. Abaqus-mallin siirtymä lähestyi Elmer-mallin siirtymää tihennettäessä verkkoa. Esimerkiksi käytettäessä 29 000 elementtiä syntyi 51500 solmupistettä, jolloin siirtymä oli 1,613 mm. Tällöin Elmer-mallin siirtymä on noin 9 % Abaqus-mallin siirtymää suurempi.

Käytettäessä Abaqus-mallissa C3D8R elementtejä ja 242 000 solmupistettä siirtymän y maksimiarvo oli 1,747 mm. Verrataan tätä Elmer-malliin, jossa on käytetty 10-solmuisia parabolisia tetraedrielementtejä (Kuva 4.2.2–4). Käytettäessä 38 000 solmupistettä siirtymän y maksimiarvo oli 1,783 mm. Nyt y -suuntaisten siirtymien välinen ero oli noin 1 %. Vastaavasti z -suunnassa ero oli noin 5 % ja pituusakselin suunnassa 1,1 %. Tämä on varsin hyvä tulos ottaen huomioon verifiointin yhteydessä käytetyt yksinkertaistukset. Verifiointin perusteella Elmer-mallissa täytyi käyttää 10-solmuisia parabolisia tetraedrielementtejä. Kehän suunnassa 60 elementtiä ja pituusakselin suunnassa 90 elementtiä.

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että Elmer-malli antoi parempia tuloksia harvemmillä elementtiverkolla. Tämä johtui Abaquksen automaattisesta verkottajasta, jonka vuoksi elementtejä ei voi lisätä pelkästään kehän suunnassa. Elmer-mallin verkkoa pystyttiin tihentämään erikseen kehän suunnassa ja akselin suunnassa. Kehän suuntaisella elementtijaolla oli merkitystä tuloksiin enemmän kuin akselin suuntaisella elementtijaolla. Laskettaessa tuloksia, Abaqus-mallissa oli kehän suunnassa harvempi ja vastaavasti akselin suunnassa tiheämpi verkko kuin Elmer-mallissa. Tulokset lähestyivät toisiaan, kun elementtiverkkoa tihennettiin siten, että kummassakin mallissa oli kehän suunnassa saman verran elementtejä (kuva 4.2.1–6). Riittävän tiheällä verkolla (yli 60 000 solmupistettä) kaikki muut paitsi C3D4 elementti antoivat Elmer-malliin verrattuna hyviä tuloksia.

5.2 Seinämänpaksuuden vaikutus

Seinämänpaksuuden vaihtelu vaikuttaa putkitelan dynaamisiin ominaisuuksiin epätasaisen massa- ja jäykkyysjakauman kautta. Kohdan 4.2 verifiointimallissa seinämänpaksuusvaihtelut olivat moninkertaiset verrattuna tutkimuksessa käytetyn koetelan seinämänpaksuusvaihteluihin. Kuormitetussa tilanteessa myös verifiointimallin siirtymät olivat moninkertaiset verrattuna koetelan FE-mallin

siirtymiin.

Seinämänpaksuusmittaus mitattiin spiraalimittauksena telahiomakoneella kahdella eri nousulla. Nousulla 10 mm/kierros saatiin noin 720 000 mittauspistettä. Nousulla 140 mm/kierros saatiin noin 50 000 mittauspistettä. Mittauksien seinämänpaksuuden arvot ilman hitsisaumaa olivat välillä 37...43 mm.

Seinämänpaksuusmittauksissa huomattiin, että ultraäänilaitteen oli vaikea havaita sisäseinämän kaikua hitsisauman kohdalla. Todennäköisesti tästä syystä kumpaankin mittaustulokseen tuli hitsisaumojen kohdalle jonkun verran yksittäisiä viereisistä arvoista huomattavasti poikkeavia arvoja. Arvot ovat mahdollisesti virheellisiä, koska ne poikkesivat yksittäisinä arvoina merkittävästi viereisistä arvoista. Hitsisaumoille ei tehty erillistä särötarkastusta. On mahdollista, että yksittäiset muista poikkeavat arvot ovat hitsisauman virheitä. Kuvien 4.3–1 ja 4.3–2 levityskuvissa erottuvat selvästi hitsisauman poikkeavat arvot. Yksittäiset poikkeavat arvot eivät kuitenkaan vääristäneet tuloksiamme. Tämä johtuu siitä, että rakennettaessa elementtiverkkoa mittausten seinämänpaksuusarvot siirretään mittauspisteistä solmupisteisiin Lagrangen kantafunktioiden avulla. Tällöin yksittäiset poikkeavat arvot eivät vaikuta mallinnustuloksiin.

Hitsisaumojen paikat ovat piirretty kuviin 4.4–1...4.4–5. Kuvista nähdään, että telan suurimmat siirtymät tapahtuvat hitsisaumojen kohdalta. Putkitelan valmistusmenetelmän vuoksi hitsisaumojen kohdalle jää epäjatkuvuuskohta, jonka materiaaliominaisuudet eroavat telan muusta materiaalista. Tällöin muodonmuutosten rajapinta asettuu hitsisaumojen kohdalle. Tutkimuksen koetelan FE-mallissa hitsisauma alkaa myötämään akselin suuntaisten hitsisaumojen kohdalta. Vastaavasti telan pullistuminen alkaa vaipan paksuimmista kohdista, koska tällöin massan aiheuttama keskeisvoima on suurempi. Kuvan 4.3–2 levityskuvasta nähdään, että vaipan paksuimmat kohdat sijaitsevat kehän suunnassa noin 3500 mm ja 1000 mm kohdissa. Kuvasta 4.4–5 huomataan, että vaipan pullistuminen on suurinta kehän suunnassa noin 3500 mm ja 1000 mm kohdissa.

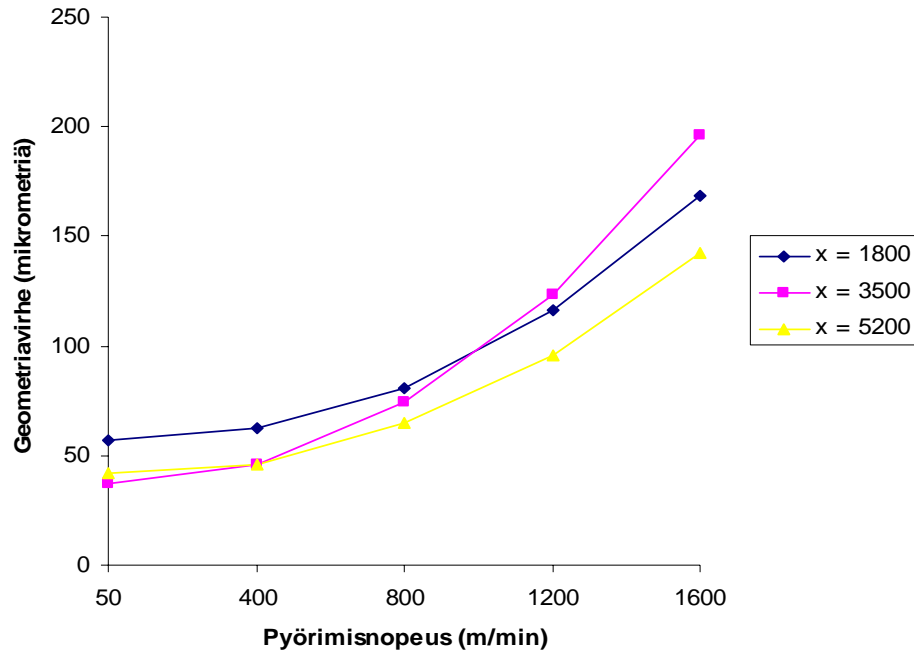
Mittaustuloksista tehtiin myös suodatettu matriisi, josta virhearvot suodatettiin pois. Tulokset eivät eronneet suodattamattomalla matriisilla saaduista tuloksista. Sekä tiheään että harvemman mittauksen antama suodattamaton paksuusmatriisi oli riittävän tarkka mallin seinämänpaksuusvaihteluiden kuvaamiseen.

5.3 Kuorimuodonmuutokset

Kuorimuodonmuutosten tarkastamista varten laskettiin siirtymän itseisarvot viidellä eri pyörimisnopeudella. Kuvista 4.4–1 ja 4.4–2 huomataan, että pienillä pyörimisnopeuksilla telojen geometrista muodonmuutosta hallitsee painovoiman aiheuttama telan taipuma. Nopeudella 50 m/min siirtymän maksimi oli noin 0,022 mm. Käytännössä tämä ei kuitenkaan aiheuta heittoa, sillä putoamis- kiihtyvyydestä johtuva taipuma ei pyöri telan mukana. Nopeuden noustessa kahdeksan kertaiseksi 400 m/min, siirtymä kasvoi noin 25 % 0,028 mm. Kun nopeus ylitti 800 m/min, alkoivat seinämänpaksuusvaihteluiden aiheuttamat keskeisvoimat hallita muodonmuutoksia (kuva 4.4–3, 4.4–4 ja 4.4–5). Tällöin kuorimuodonmuutokset kasvoivat ja tela muutti geometrista muotoaan nopeammin. Esimerkiksi nopeudella 1200 m/min siirtymän maksimiarvo oli noin 0,078 mm, kun nopeudella 1600 m/min siirtymän maksimiarvo oli noin 0,124 mm. Nopeuden kasvaessa noin 33 %, siirtymä kasvoi noin 59 %.

Telan poikkileikkauksen geometriavirheen arvo kuvaa heiton arvoa, jossa ei ole huomioitu kieppumisen aiheuttamaa taipumaa. Geometriavirheen arvot laskettiin viidellä eri pyörimisnopeudella kolmesta eri poikkileikkauksesta. Tulokset on esitetty kuvassa 4.4–6. Geometriavirhe oli suurimmillaan nopeudella 1600 m/min 196,3 µm.

Kuvaan 5.3–1 on piirretty telan poikkileikkauksen geometriavirheet pyörimisnopeuden funktiona kohdista $x = 1,8$ m, $x = 3,5$ m ja $x = 5,2$ m. Kuvasta nähdään, että muodonmuutokset kasvavat eksponentiaalisesti nopeuden kasvaessa. Tämä johtuu keskeivoiman kasvamisesta nopeuden neliössä (kaava 16).



Kuva 5.3–1. Telan poikkileikkausten geometriavirheet pyörimisnopeuden funktiona.

Tulosten perusteella telan seinämänpaksuusvaihtelut on saatu siirrettyä malliin riittävällä tarkkuudella ja malli toimii oikein.

5.4 Virhetarkastelu

FE-mallinnuksessa tehdään lähes aina yksinkertaistuksia. Tässä kappaleessa esitetään tuloksiin mahdollisesti vaikuttavia yksinkertaistuksia.

Reunaehtoina käytettiin kummassakin päässä jäykkää kiinnitystä. Reunaehdot kuvaavat päätylaippojen vaikutusta vaippaan ja ovat todellista jäykemmät.

Verifiointiosassa Abaqus-mallin sisäpinta on ellipsin muotoinen ja ulkopinta täysin ympyrämäinen. Elmer-mallin ellipsi ei ollut ideaalisen tarkka vaan sisäseinämän ellipsin muoto on laskettu 24 pisteessä. Tällöin mallin tilavuuksissa on pieni ero. Tämän vuoksi Elmer-mallin keskeisvoima ei vastannut täysin Abaqus-mallin pyörimisen aiheuttamaa keskeisvoimaa. Erot siirtymissä saatiin optimoitua muutamiin prosentteihin, joka tässä yhteydessä oli riittävä.

Ultraäänimittalaite ei havaitse telan kartiokkuutta. Tällöin koetelan mahdollinen

kartiokkuus ei tule huomioiduksi mittaustuloksissa. Ulkopinnan ympyrämäisyysprofiilia ei mitattu. Tyypillisesti hionnassa telan geometriavirhe on huomattavasti pienempi (luokkaa 0,01...0,02 mm) kuin seinämänpaksuusvaihtelut, joten sen vaikutus mallinnustuloksiinkin on vähäistä.

Teräksisessä telassa muodonmuutoksiin vaikuttavat telan useat eri virheet. Ideaalisen pyöreän ja putkimaisen telan muodonmuutokset ovat pienempiä, kuin todellisessa tilanteessa. Mallin antamat tulokset saattavat olla todellista tilannetta hieman pienempiä, koska kaikkia virhetekijöitä ei ole mallissa otettu huomioon.

5.6 Ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi

Hitsisaumoille tulisi tehdä erillinen säröntarkastus. Tällöin tiedettäisiin, onko hitsisaumoissa virheitä vai onko ultraäänilaitteella mitatuissa tuloksissa virhearvoja.

Telan päätylaipat ja -akselit voidaan mallintaa, jolloin on mahdollista tutkia mallin avulla mitattavan telan ominaismuotoja ja -taajuuksia. Tela tulisi tällöin olla tuettu päätyakseleista. Samalla tulisi tarkastella erilaisia päätyjen reunaehdoja.

Tällä hetkellä ohjelma laskee mallin tilavuuden ja massan syötettyjen materiaalitietojen perusteella. Ohjelmaa voidaan laajentaa laskemaan mahdollisia vaipan sisäpuolisia korjausmassoja telamallin epätasapainon ja kuorimuodonmuutosten kompensoimiseksi.

Ohjelmaa voidaan kehittää mittausdatan käsittelyn osalta siten, että seinämänpaksuusmatriisin tietoja hyödynnettäisiin laajemmin.

6 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli siirtää tutkimuksessa käytetyn koetelan mitatut geometriatiedot elementtimenetelmään perustuvaan tilavuusmalliin. Putkitelan seinämänpaksuusvaihtelun on tiedetty vaikuttavan telan dynaamiseen käyttäytymiseen. Kirjallisuustutkimuksen perusteella aiemmin ei ole mallinnettu telaa, jossa seinämänpaksuus muuttuisi. Tyypillisesti telamallit ovat olleet palkkimalleja, jolloin kuorimuodonmuutoksia ei voida mallintaa. Tutkimusta varten mitattiin koetelan seinämänpaksuus. Tutkimuksessa seinämänpaksuusmittausta käytettiin solmupisteiden koordinaattien määrittämiseksi telan geometrian mallintamisen lähtötietoina. Aiemmin ultraäänimittausta on hyödynnetty valmistuksen aikaisessa telan dynaamisessa tasapainotuksessa.

FE-malli muodostettiin tekemällä elementtiverkko Matlab-ohjelmalla. Ohjelma ottaa mittaamatriisista telan paksuustiedot ja määrittää mallin solmupisteiden koordinaatit Lagrangen kantafunktioiden avulla. Ohjelma tekee Elmer-ohjelmistoa varten elementti-, solmu-, reunaehto- ja otsikkotiedostot. Tämän jälkeen malliin voidaan asettaa voimia, ja Elmer-ohjelmistolla voidaan tarkastella voimien aiheuttamia muodonmuutoksia tai jännitystiloja.

Ohjelman toimivuus testattiin vertaamalla Elmer-ohjelmistolla laskettuja tuloksia Abaqus-ohjelmistolla laskettuihin tuloksiin. Verifioinnin perusteella Abaqus-ohjelmistolla ja Elmer-ohjelmistolla laskettujen y -suuntaisten siirtymien välinen ero oli noin 2 %. Vastaavasti z -suunnassa ero oli noin 5 % ja pituusakselin suunnassa noin 1 %. Erot saattavat johtua verifioinnissa käytettyjen mallien sisähalkaisijan geometriaeroista, jotka syntyivät muodostettaessa seinämänpaksuusmatriisia likimääräisesti kohdan 3.2 mukaisesti.

Tulosten kannalta ongelmallista oli mallinnuksessa käytettävien yksinkertaistuksien vaikutusten analysointi. Kaikkia koetelan virheitä, kuten hitsisauman kimmomoduulia, ei kyetä mittaamaan, joten niiden mallintaminen on tällä hetkellä mahdotonta. Muiden virheiden vaikutus telan dynaamisiin ongelmiin on seinämänpaksuusvaihteluiden rinnalla todennäköisesti erittäin pientä.

Tehdyllä ohjelmalla on tulevaisuudessa monia käyttösovelluksia, niin tutkimuskäytössä kuin teollisuudessakin. Putkitelan massa ja tilavuus voidaan arvioida koosta riippumatta pelkän ultraäänimittauksen perusteella. Lisäksi telan dynaamista käyttäytymistä voidaan tarkastella FE-mallin avulla. Toteutettu ohjelma on myös helppokäyttöinen ja ultraäänimittauksen jälkeen FE-mallin muodostaminen on vaivatonta. Mallin pituus, halkaisija ja verkon tiheys ovat ainoat arvot, jotka käyttäjän täytyy syöttää.

Tulevaisuudessa ohjelmaa voidaan käyttää telatutkimuksen ja -valmistuksen lisäksi esimerkiksi kunnossapidossa. Ohjelman avulla tehty malli voi vähentää muun muassa telan valmistukseen ja kunnostukseen käytettävää aikaa ja säästää siten kustannuksia. Ohjelmaa voidaan käyttää myös jatkossa uusien telojen mallintamisessa ja valmistustoleranssien määrittämisessä.

7 LÄHDELUETTELO

1. **Pullinen, J et al.** Raippa-projektin vastatelan kunnostuksen loppuraportti: Kunnostuksen vaikutus telan dynaamiseen käyttäytymiseen. Teknillinen korkeakoulu, Koneensuunnittelun laboratorio. Otaniemi 1997. ISBN 951-22-3741-5. 74 s.
2. **Juhanko, J.** Paperikoneen putkitelan dynaaminen käyttäytyminen. Licensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 1999. 82 s.
3. **Juhanko, J et al.** Raippa-projektin loppuraportti: Paperikoneen päällystysaseman vastatelan dynaamisesta käyttäytymisestä. Teknillinen korkeakoulu, Koneensuunnittelun laboratorio. Espoo 1999. 88 s.
4. **Savolainen, M.** Paperikoneen telan mittaus- ja tasapainotusjärjestelmän kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 1996. 68 s.
5. **Pirttiniemi, J.** Roottorin tasapainotusmenetelmän kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 2004. 84 s.
6. **Haikio, J.** Sorvausjärjestelmän telan geometriavirheen pienentämiseksi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 1997. 78 s.
7. **Kyröläinen, A., Lukkari, J.** Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. MET-julkaisuja nro 2/1999. Metalliteollisuuden keskusliitto. Metalliteollisuuden kustannus Oy. ISBN 951-817-695-7. 530 s.
8. **Kuosmanen, P.** Kahden sylinterin kosketuspaineen optimointi. Licensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 1992. 86 s.
9. **Julkunen, T.** Paperikoneiden teräsputkirunkoisten telojen tasapainotuksesta. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. Jyväskylä 1974.

10. **Väänänen, P.** Joustavan roottorin sorvaus tarkan ympyrämäisyysprofiilin mittauksen ja aktiivisen värähtelyjen kompensoinnin avulla. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 1993. 104 s.
11. **Pennala, E.** Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. Otatieto Oy. Helsinki 1999. ISBN 951-672-288-1. 314 s
12. **Pennala, E.** Lujuusopin perusteet. Otatieto Oy. Helsinki 2000. ISBN 951-672-297-0. 400 s.
13. **Himmi, M.** Sorvin modernisointi telahiomakoneeksi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 2002. 72 s.
14. **Juhanko, J., Kuosmanen, P.** Telojen geometria. Paperikoneen telat 23–24.3.2004. Kunnossapitoyhdistys ry. Nokia 2004. 13 s.
15. **Pullinen, J., Porkka, E.** Telan tasapainotus ja dynaaminen käyttäytyminen. Paperikoneen telat 23.–24.3.2004. Nokia 2004. 14 s.
16. **Snellman, J.** Valmistustarkkuuden vaikutus paperikoneen huovan- ja paperinjohtotelojen dynaamiseen käyttäytymiseen. Diplomityö. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. Oulu 1983. 90 s.
17. **Shnoro, V.** Telojen käynninaikainen valvonta. Telojen laikka- ja nauhahionta sekä timanttisorvaus 15.–16.11.1999. Kunnossapitoyhdistys ry. Jämsänkoski 1999. 47 s.
18. **Airila, M et al.** Koneenosien suunnittelu. 2. tarkistettu painos. WSOY. Porvoo 1997. ISBN 951-0-20172-3. 796 s.
19. **Pramila, M.** Värähtelymekaniikka. Julkaisussa: Airila, M et al. Koneenosien suunnittelu 4. WSOY. Porvoo 1985. ISBN 951-0-13223-3. 161 s.
20. **Uski, T.** Paperikoneiden telapinnoitteiden ultraäänitarkastus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Otaniemi 1999. 53 s.
21. **International Standard ISO 1101.** Geometrical Product Specifications– Geometrical tolerancing– Tolerances of form, orientation, location and run-out. 2nd edition. 2004. 54 p.

22. **Haataja, J et.al.** Numeeriset menetelmät käytännössä. CSC- Tieteellinen laskenta Oy. Helsinki 2002. ISBN 951-9821-81-6. 407 s.
23. **Salonen, E.** Dynamiikka II. Otatieto Oy. Helsinki 1999. ISBN 951-672-281-4. 199 s.
24. **Kervinen, M et.al.** MAOL-taulukot. 1.-8. uudistettu painos. Kustannusosakeyhtiö Otava. Keuruu 1996. ISBN 951-1-12112-X. 157 s.
25. **Hakala, M.** Lujuusopin elementtimenetelmä. Otatieto Oy. Espoo 1997. ISBN 951-671-395-5. 490 s.
26. **Ikonen K.** Levy, laatta- ja kuoriteoria. Otatieto Oy. Helsinki 1990. 333 s.
27. **Juhanko, J et.al.** Research in Paper Machine Technology. Teknillinen korkeakoulu. Koneensuunnittelun laboratorio. Microsoft Powerpoint esityskalvot. 14 s.
28. **Kinnunen, A.** Paperitelan komposiittitelan muodonmuutostutkimus. Diplomityö 1998. Oulun Yliopisto, Konetekniikan osasto. 49s.
29. **Widmaier, T.** Ultraäänimittalaitteen tekniset tiedot ja ohjelmiston kuvaus. Julkaisematon raportti. Teknillinen korkeakoulu. Koneensuunnittelun laboratorio. 1995.
30. **Hibbit, Karlsson et.al.** Abaqus Theory Manual Version 5.8. USA. 1998.