

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

Ari Levomäki

**HENKILÖAUTON KORIN MALLINTAMINEN VIRTUAALITESTEJÄ
VARTEN**

Työn tarkastajat:

Professori TkT Aki Mikkola

Tutkijaopettaja TkT Kimmo Kerkkänen

Työn ohjaaja:

Ins. Jouni Koskinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

Ari Levomäki

Henkilöauton korin mallintaminen virtuaalitestejä varten

Diplomityö

2010

75 sivua, 36 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastajat: Professori TkT Aki Mikkola

Tutkijaopettaja TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: elementtimenetelmä, mallinnus, ympäriajoturvallisuus, virtuaalitestaus

Keywords: finite element method, modelling, roll-over safety, virtual testing

Nykyään auton korien tuotekehitysprosessissa jää hyvin vähän aikaa korin rakenteiden optimointiin. Rakenteiden optimointi tehdään virtuaalitestauksen avulla siten, että yhdellä elementtimallilla tehdään erilaisia testejä ja optimoidaan useita ominuuksia samanaikaisesti

Tässä tutkimuksessa tavoitteena on kehittää auton korin FEM-malli, jolla voidaan suorittaa mahdollisimman monta erilaista virtuaalitestä. Rakennetun mallin toimivuutta testattiin tekemällä sille ympäriajoturvallisuustesti ja saatuja tuloksia verrattiin oikean auton testiin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Degree Programme of Mechanical Engineering

Ari Levomäki

FE-modelling of car body for virtual tests

Master's thesis

2010

75 pages, 36 figures and 3 tables

Examiners: Professor D. Sc. (Tech.) Aki Mikkola

Lecturer-researcher D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: finite element method, modelling, roll-over safety, virtual testing

Today the time window reserved for the car body structural optimization is very limited. The structural optimization is done with virtual testing. One finite element model is used in several different tests and optimization of multidisciplinary variables.

The objective of this research is to develop a car body model which is employable in several variable virtual tests. The quality of this model was tested against the real roll-over test.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Valmet Automotive Oy:n esittely	1
1.2	Tutkimuksen tausta	2
1.3	Tutkimusongelma	3
1.4	Tutkimuksen tavoitteet	4
2	AUTON KORIN FEM-ANALYYSIT YLEISESTI	5
2.1	Auton korien kehittämisessä käytettävät analyysityypit.....	6
2.1.1	Analyysit implisiittisellä laskentamenetelmällä.....	6
2.1.2	Analyysit eksplisiittisellä laskentamenetelmällä	8
2.1.3	Laskentamenetelmän valinta.....	10
2.2	Auton korin FE-mallin rakentamisen vaiheet yleisesti.....	12
2.2.1	Rautalankamallin pinnoittaminen	13
2.2.2	Elementtiverkon rakentaminen pintamallien avulla	18
2.2.3	Symmetrian hyväksikäyttö.....	20
3	YLEISKÄYTTÖISEN FE-MALLIN RAKENTAMINEN	22
3.1	Elementtityyppien valinta	22
3.1.1	Elementit implisiittisen ratkaisijan analyyseissä.....	23
3.1.2	Elementit eksplisiittisen ratkaisijan analyyseissä	24
3.2	Elementtien koon valitseminen.....	25
3.2.1	Elementtikoon merkitys implisiittisissä ratkaisijoissa	25
3.2.2	Elementtikoon merkitys eksplisiittisissä ratkaisijoissa	26
3.2.3	Elementtikoon merkitys kontaktitilanteissa	26
3.2.4	Elementtikoon merkitys värähtelyiden laskennassa	27
3.3	Laajojen tasaisten pintojen mallintaminen	27
3.4	Urien, reikien ja muiden yksityiskohtien mallintaminen.....	28
3.5	Osien liitosten mallintaminen	29

3.5.1	Pistehitsausliitosten mallintaminen.....	30
3.5.2	Kaarihitsausliitosten mallintaminen.....	35
3.5.3	Laserhitsausliitosten mallintaminen.....	36
3.5.4	Ruuviliitosten mallintaminen.....	37
3.5.5	Liimaliitosten mallintaminen.....	37
3.6	Yhteenvedo aikaansaadusta mallista.....	38
4	VIRTUAALINEN YMPÄRIAJO TESTI.....	40
4.1	Ympäriajoturvallisuutta koskeva standardi FMVSS 216.....	41
4.2	Laskentaparametrit virtuaalisessa ympäriajotestissä.....	42
4.2.1	Laskennassa käytettävät yksiköt.....	42
4.2.2	Teräksen materiaalmallit.....	43
4.2.3	1D-elementit.....	44
4.2.4	Levynpaksuuksien määrittely.....	44
4.2.5	Käytettävät tuennat ja kuormitustavat.....	44
4.2.6	Käytettävä kontaktialgoritmi.....	46
4.3	Laskenta.....	46
4.4	Virtuaalisen ympäriajotestin tulokset.....	47
5	YMPÄRIAJO TESTI OIKEALLE AUTON KORILLE.....	49
5.1	Testikorin valmistaminen.....	49
5.1.1	Korin osien irrotus.....	51
5.1.2	A-pilareiden vahvikeputkien tekeminen.....	54
5.1.3	Osien kiinnittäminen ja kokoonpano.....	58
5.2	Korin koestamisen valmistelu.....	60
5.2.1	Korin kiinnittäminen.....	60
5.2.2	Paininlaitteiston ja mittausantureiden asentaminen.....	63
5.3	Korin testaus ja tulokset.....	66
6	TESTITULOSTEN VERTAILU.....	71
6.1	Virhelähteet simulaatiossa.....	73

6.2	Virhelähteet fysikaalisessa testissä	74
6.3	Auton korin FE-analyysien luotettavuuden parantaminen	74
7	YHTEENVETO	75

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa on tarkoituksena rakentaa elementtimenetelmään perustuva henkilöauton korin malli, joka soveltuisi mahdollisimman monen erilaisen virtuaalitestin tekemiseen. Tutkimustyö on tehty suomalaisen autotehtaan Valmet Automotive Oy:n tuotekehitysosastolla Uudessakaupungissa.

1.1 Valmet Automotive Oy:n esittely

Valmet Automotive Oyj on suomalainen erikoisautojen valmistaja ja se on nykyisin osa Metso-konsernia. Tuotannon alettua v. 1969 yritys on valmistanut jo yli 1,1 miljoonaa henkilöautoa. Valmet Automotiven yhdeksän hehtaarin tuotantotilat sijaitsevat 220 hehtaarin tehdasalueella Uudessakaupungissa Suomen länsirannikolla.

Kaikki alkoi vuonna 1968, jolloin tehdas perustettiin Uuteenkaupunkiin ruotsalaisen Saab-Scanian ja suomalaisen Valmetin tasaomistussuhteisena Saab-Valmetina. Vuonna 1989 ruotsalaisten omistusosuus siirtyi Saab Automobilelle, jonka omistivat puoliksi Saab-Scania ja General Motors. Kevästä -92 alkaen Valmet omisti 100 % yrityksestä. Syyskuussa 1995 yritys nimettiin Valmet Automotiveksi. Valmetin ja Rauman yhdistymisestä (v. 1999) lähtien yrityksen on omistanut yritysten yhteenliittymästä syntynyt Metso Oyj.

Tehtaalla on 40-vuotinen historia ja toiminta-aikanaan tehtaalla on valmistettu monia erimerkkisiä autoja. Ensimmäiseksi tehtaalla alettiin valmistamaan Saab 96 -malleja. Ensimmäiset kymmenen vuotta Saab-Valmetilla valmistettiin vain Saabeja (malleja: 96, 99, CD, 900) ja vuonna -78 linjalle tuli uutena merkkinä Chrysler/Talbot 1510. Talbot Horizonin valmistus alkoi vuonna -80 ja pian perään vuonna -81 Talbot Solara. Vuonna 1982 Saabin 900-mallien valmistus tuli taas vahvemmin kuvaan Saab 900-mallien muodossa ja niiden lisäksi vuonna -84 alkoi Saab 90-mallin valmistus ja vuonna -86 tehtaalla tehtiin jokunen 9000-mallikin. Vuosina 1991-1997 valmistettiin GM:n Opel Calibra -autoja ja 1996-1998 Lada Euro-Samara -autoja.

Vuonna 1986 tehtaalla alkoi avoautojen tuotanto. Vuodesta 1986 vuoteen 1993 valmistettiin ensimmäisen sukupolven Saab 900 -avoautoja. Keväällä 1994 alkoi seu-

raavan sukupolven Saab 900 -avoauton valmistus. Vuonna 1998 toisen sukupolven Saab 900 Convertible muuttui hieman ja sai mallimerkinnäkseen 9-3 Convertible.

Viime vuosina Valmet Automotive on profiloitunut voimakkaasti hybridien ja sähkökäyttöisten ajoneuvojen kehittäjäksi ja valmistajaksi. Kirjoitushetkellä Valmet Automotiven asiakkaina ovat Dr. Ing. H.c. F. Porsche AG (Porsche Boxster ja Cayman -autot), Think AS (Think City -sähköautot), Garia A/S (Garia Golf Car -sähkökäyttöiset golfautot). Kuluvana vuonna pitäisi alkaa myös Fisker Karma -hybridiautojen valmistus Fisker Automotive Inc. -yritykselle.

1.2 Tutkimuksen tausta

Autoteollisuudessa autojen kehitystyössä on siirrytty voimakkaasti virtuaaliprototyyppien käyttöön. Tietokonelaskentakapasiteetin tultua edullisemmaksi ja helpommin saatavaksi ja virtuaaliprototyyppien kehittyminen vastaamaan luotettavammin todellisuutta, on fyysisten prototyyppien rakentaminen jatkuvasti vähentynyt. Jatkuvasti tiukentuvat turvallisuussäädökset ovat olleet merkittävin vaikutin virtuaaliprototyyppien käyttöönottoon ja jatkuvaan lisääntyvään käyttöön. Kuluttajien ja kuluttajajärjestöjen vaatimukset sekä uudistuvat säädökset aiheuttavat sen, että koko auton ja ennen kaikkea sen korin käyttäytyminen pitää selvittää ja saada onnettomuustilanteissa toimimaan turvallisuusvaatimusten edellyttämällä tavalla.

Uuden automallin suunnittelu on aina ollut ja tulee aina olemaan varsin iso ja vaikea tehtävä. Autoja ostavat asiakkaat ovat tulleet koko ajan vaativammaksi ja autonvalmistajien välinen kilpailu asiakkaista on koventunut. Autoilta myös vaaditaan aina vain parempaa kolariturvallisuutta. Nämä yhdessä lisäävät tarvetta saada koko ajan parantuvia menetelmiä ja työkaluja autojen tuotekehityksen avuksi.

Tämän hetken selvä tendenssi on autojen jatkuva painon kasvaminen. Turvarakenteiden ja matkustusmukavuutta lisäävien elementtien lisääntynyt käyttö on painon kasvun pääsyitä. Virtuaalisella prototyyppillä voidaan turvallisuusominaisuuksien ja painon optimointi suorittaa paljon oikeiden prototyyppien rakentamista ja testaamista halvemmalla ja nopeammin.

Autojen matkustusmukavuuden tärkeimpiä parannuskeinoja on sen värähtelyiden minimoiminen. Kuljettajaan ja matkustajiin kohdistuva värähtely ja melu ovat molemmat värähtelyä. Virtuaalinen prototyyppi myös on tärkein tutkimus- ja suunnittelu-apukeino värähtelyiden hallinnassa.

Virtuaalisten prototyyppien rakentaminen on kuitenkin myös aikaavievää ja siksi niiden rakentamiseen käytettävää aikaa pyritään minimoimaan. Tarkka yksityiskohdainen virtuaaliprototyyppi antaa oikeinkäyttötynä hyvinkin todellisuutta vastaavia tuloksia mutta toisaalta niiden tietokoneella tehtävä laskenta-aika pitenee. Karkeammin tehty virtuaalimalli antaa nopeammin tuloksia mutta tulokset ovat enemmän suuntaa-antavia, tämäkin on tosin joissain tapauksissa täysin riittävää.

Autoteollisuudessa eri virtuaalikoestusmenetelmin tutkittavia asioita ovat mm:

- korin ja sen osien jäykkyydet ja värähtelyominaisuudet
- rakenteiden muodonmuutokset erilaisissa törmäystilanteissa
- paino- ja rakenneoptimointi
- osien väsymisenkesto ja murtumisalttius
- eri mekanismien ja komponenttien liikeradat ja dynaamiset ominaisuudet
- matkustajien loukkaantuminen törmäystilanteissa
- metallilevyjen syvävetoprosessit
- virtauslaskelmat (aerodynamiikka ja auton nestejärjestelmät)
- rakenteiden lämmönjohtuminen
- rakenteiden akustiset ominaisuudet

1.3 Tutkimusongelma

Ongelma on virtuaalitestauksessa tarvittavien erilaisten mallien suuri määrä. Mallien määrää ja mallien valmistamiseen kuluvaa aikaa pitäisi pystyä vähentämään. Yksi ratkaisu tähän ongelmaan on rakentaa malli tai malleja, jotka ovat käyttökelpoisia mahdollisimman monen erilaisen analyysin tekemiseen.

Duddeck (2007, 4) mukaan nykyään auton tuotekehitysprosessissa auton korin rakenteiden optimointiin jää enää aikaa 1-2 viikon pituinen ajanjakso. Tämän vuoksi

korien virtuaalitestauksessa pyritään siirtymään monien suunnitteluparametrien yhtäaikaiseen optimointiin (multidisciplinary optimization). Tällöin yhdessä laskentajossa voidaan optimoida useita satoja muuttujia (esim. korin peltien paksuudet). Päämääränä näissä optimointitehtävissä on saada korin paino mahdollisimman alhaiseksi. Tällaiseen laskentamalliin täytyy sisällyttää eri törmäystyypit, korin staattiset ja dynaamiset analyysit ja näin yhden ja saman elementtimallin täytyy olla soveltuva kaikille näille testeille.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tavoitteena on kehittää FE-laskentamalli, jolla voidaan suorittaa mahdollisimman monta erilaista virtuaalitestä. Pääasiallinen tavoite viime kädessä on siis lyhentää projektissa tarvittavien mallien valmistukseen ja testauksiin kuluva kokonaisaika. Virtuaalimallin tekoon kuluva aika, laskenta aika ja saatavien tulosten tarkkuus ovat siis ne kolme seikkaa, jotka pitäisi yhteenkuuluvina optimoida kulloisessakin tapauksessa.

Tavoitteena on löytää eri lähteistä tietoja aiheen tämänhetkisestä tietämyksestä. Tavoitteena on kerätä samojen kansien väliin käytännön tietoa käytettäväksi aihepiiriin liittyvien projektien yhteydessä.

Tutkimuksen tavoitteina on kartoittaa hyvät mallinnustavat ja tehdä niiden avulla yksi FE-malli. Tälle mallille on tarkoitus tehdä FMVSS 216 -standardin mukainen ”Roof Crush Resistance” -ympäriajoturvallisuustesti. Tämä testi tehdään sekä kehitelyn tuloksena saadulla FE-mallilla että oikealla auton korilla. Tällä kahden testin sarjalla saadaan kuva kehitellyn mallin toiminnasta ja soveltuvuudesta kyseisen tyyppisen testin tekemiseen.

Tutkimuksen sivutuotteena on tarkoitus selvittää tarvittavien tietoteknisten resurssien tarve sekä saada tietoa tutkimuksessa käytetyn auton käyttäytymisestä ympäriajotestissä siihen asennetuilla lisävahvistuksilla.

2 AUTON KORIN FEM-ANALYYSIT YLEISESTI

Elementtimenetelmä on likimääräinen, numeerinen laskentamenetelmä, jonka avulla voidaan ratkaista ongelmia, joihin analyttiset käsikirjakaavat eivät sovellu. Menetelmän nimi ”elementtimenetelmä” tulee sen englanninkielisestä nimestä ”finite element method”, josta on otettu käyttöön myös Suomessa menetelmän nimenä käytetty lyhenne ”FEM” (finite = äärellinen, rajallinen).

Ensimmäiset yritykset elementtimenetelmän käyttämiseksi rakenteiden lujuusanalyysiin tehtiin lentokoneiteollisuuden piirissä 1950-luvun alkupuolella. Terminä elementtimenetelmä esiintyi ensimmäisen kerran noin vuonna 1960. Elementtimenetelmä kehittyi nopeasti 1960-luvulla rinnan tietokoneiden kehittymisen kanssa. Suomessa ensimmäiset elementtimenetelmän sovellukset tehtiin 60-luvun lopussa ja 70-luvun alussa käynnistyi menetelmän opetus korkeakouluissa (Hakala 1980, 13).

Edellisessä kappaleessa mainitun elementtimenetelmän lisäksi 70-luvun puolessavälissä kehitettiin eksplisiittinen elementtimenetelmä. Tätä laskentamenetelmää alettiin ensimmäisenä käyttää sotateollisuudessa, jossa sen avulla tutkittiin aseiden tuhovoi-
maa sekä kehitettiin tavanomaisten aseiden sekä ydinaseiden iskuja kestäviä rakenteita (Jacob & Goulding 2002, 8). Koska eksplisiittinen menetelmä kehitettiin, sekaannusten välttämiseksi kutsutaan alkuperäistä elementtimenetelmää tarvittaessa implisiittiseksi menetelmäksi.

Elementtimenetelmän perusajatuksena on, että mikä tahansa rakenne voidaan jakaa yksinkertaisiksi perusosiksi kuten palkeiksi (1D-elementit), kuorielementeiksi (2D-elementit) tai tilaelementeiksi (3D-elementit). Yhden tällaisen perusosien jäykkyys- ja lujuusominaisuudet (esim. venyminen vetojännityksen alaisena) eri kuormitus-suunnassa määritetään laskentamalliin itse. Jäykkyys- ja lujuusominaisuudet saadaan yleensä materiaaliominaisuusjulkaisuista tai voidaan selvittää esimerkiksi mittaamalla laboratorioissa todellisten testikappaleiden lujuusominaisuuksia. Näistä perusosista kootaan tutkittava kokonaisuus (esim. auton kori) ottamalla huomioon kaikki osien väliset riippuvuussuhteet. Näin saadaan luotua rakenteesta laskentamalli, jonka dimensiot ja käyttäytyminen halutussa kuormituksessa oletetaan vastaavan todellisen rakenteen käyttäytymistä samanlaisessa kuormituksessa. Elementtimenetelmällä voidaan laskennallisesti määrittää erilaisten kuormitusten vaikutus rakenteeseen, voi-

daan tutkia eri muuttujien kuten esimerkiksi eri materiaaliarvojen ja seinämänpaksuuden vaikutusta ja testata usein nopeasti ja helposti erilaisten rakennevaihtoehtojen käyttäytymistä.

Elementtimenetelmän taustalla olevasta teoriasta löytyy runsaasti siitä kertovaa kirjallisuutta ja halutessaan sitä voi etsiä luettavakseen esimerkiksi hakusanoilla: elementtimenetelmä, FE-analyysi, FEM, finite element method, -analysis, -procedures.

2.1 Auton korien kehittämisessä käytettävät analyysityypit

Kuten edellä todettiin, jakaantuvat auton korien kehittämisessä käytettävät elementtimenetelmät useampaan alalajiin. Ylimmän jakotason määrittävät menetelmässä käytettävä joko implisiittinen tai eksplisiittinen aikaintegrointi. Implisiittinen FEM-analyysi jakautuu lineaariseen ja epälineaariseen laskentamenetelmään. Nimiensäkin mukaisesti näillä lasketaan joko lineaarisesti tai epälineaarisesti käyttäytyviä tutkimusongelmia.

Eksplisiittinen menetelmä on perusluonteeltaan soveltuvampi voimakkaasti epälineaaristen ja/tai nopeita liikenopeuden muutoksia sisältävien ilmiöiden tutkimiseen mutta silläkin voidaan tietyissä tilanteissa tehdä samoja analyysejä kuin implisiittisellä menetelmällä.

Mainittakoon tässä yhteydessä, että auton korin kehittämiseen käytetään usein nykyään myös CFD-analyysiä (Computational Fluid Dynamics). CFD-analyysin avulla voidaan autolle tehdä mm. virtuaalituulitunnelitutkimuksia. CFD-analyysiohjelmien laskentaperiaate perustuu yleensä elementtimenetelmään mutta CFD-aihepiiriä ei käsitellä tässä tutkimuksessa.

2.1.1 Analyysit implisiittisellä laskentamenetelmällä

Implisiittinen lineaarinen menetelmä tarkoittaa FEM-analyysin laskentatapaa, jossa tutkittavasta kappaleesta muodostetaan elementtimallin avulla lineaarisesti kuormitukseen vastaava malli. Yhdellä elementillä on sille määritellyt jäykkyysominaisuudet

sen eri kuormitussuuntiin. Koko elementtimallista muodostetaan kaikkien siihen kuuluvien elementtien jäykkyystietojen avulla jäykkymatriisi. Elementtimalliin laaditaan laskentaa varten reunaehtoja (esim. kiinnitykset, solmujen liikkumis- ja kiertymisestomääritykset) ja kuormituksia (esim. kappaleeseen kohdistuvat voimat, omapaino). Tämän jälkeen sitten lasketaan jäykkymatriisia vasten millaiseksi kappale muotoutuu siihen kohdistetuilla voimilla tai millaiset ominaisvärähtelytaajuudet ja -muodot sillä on (värähtelylaskenta). Tällaisessa lineaarisessa analyysissä lasketaan mikä on kappaleeseen kohdistuvien voimien ja kappaleen voimia vastustavien ominaisuuksien tasapainotila.

Implisiittisen epälineaarisen laskenta on periaatteessa sama laskentatapa kuin lineaarinenkin mutta tutkittavaan elementtimalliin vaikuttavat voimat asetetaan vaikuttamaan asteittain useana laskentavaiheena. Tämä tarkoittaa sitä, että kappaletta kuormitetaan vaiheittain esim. vaikka 1/10-osalla lopullisesta voimasta ja jokaisessa vaiheessa ratkaistaan systeemin tasapainoyhtälö. Globaali jäykkymatriisi muodostetaan jokaisessa vaiheessa uudestaan ja voiman lisäämistä jatketaan kunnes koko voima on vaikuttamassa kappaleeseen. Implisiittistä epälineaarista laskentaa käytetään sellaisissa tutkimuksissa, jossa esim. osa auton korista taipuu varsin lineaarisesti paljon.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{f_{ex}\} \quad (1)$$

$[M]$ = *systeemin massamatriisi*

$\{\ddot{x}\}$ = *solmujen kiihtyvyyksvektorit*

$[K]$ = *systeemin jäykkymatriisi*

$\{x\}$ = *solmujen siirtymävektorit*

$\{f_{ex}\}$ = *ulkoisten voimien vektorit*

Kantavana peruseriaatteena implisiittisessä laskentamenetelmässä on se, että systeemin (katso yhtälö 1) (massa-, kiihtyvyy-, jäykkyy-, siirtymä- ja ulkoisen voiman

matriisit) globaali tasapaino on aina pystyttävä ratkaisemaan. Jos tämä ei onnistu, saadaan ongelma ratkaistua usein eksplisiittisen menetelmän avulla.

Implisiittistä lineaarista laskentaa käytetään paljon auton koreihin liittyvässä laskennassa. Sen avulla lasketaan ja kehitetään korin taivutus- ja kiertojäykkyyttä sekä tutkitaan ja kehitetään korin ominaisvärähtelyitä. Ominaisvärähtelytutkimuksen tavoitteena on nostaa korin alimpia ominaisvärähtelytaajuuksia mahdollisimman korkeaksi. Ihminen tuntee ja havaitsee korin värähtelyjä sitä huonommin mitä korkeampia värähtelytaajuudet ovat. Erityisesti avoautoissa korin värähtelyiden optimointi on tärkeää, koska koria jäykistävän peltikaton puuttuminen aiheuttaa korin jäykkyyden ja samalla alimpien ominaisvärähtelytaajuuksien roimaa alenemista. Tällöin korin alin pitkittäinen vääntövärähtelytaajuus putoaa ihmisen hyvin havaitsemalle alueelle. Tämän vääntövärähtelyn amplitudi on myös usein niin suuri, että auton kuljettaja helposti havaitsee taustapeilistä taaksepäin katsomalla, että auton keula ja perä vääntyilevät toisilleen vastakkaiseen tahtiin (cowl shake –ilmiö). Avoauton korin värähtelyitä yritetäänkin usein vaimentaa koriin kiinnitettävillä värähtelynvaimentimilla.

Värähtelyanalyysien avulla hiotaan myös korin peltiosien akustisia ominaisuuksia. Korin osien resonointiominaisuuksia tutkitaan lineaarisella FEM-analyysillä. Peltiosien eri alueiden melua tuottavia värähtelyjä yritetään ehkäistä suunnittelemalla osiin erilaisia taitteita, jotka muodollaan jäykistävät osaa ja nostavat levykenttien ominaisvärähtelytaajuuksia. Jälleen tässäkin, ihminen huomaa helpommin tai kokee yleensä epämiellyttävämpänä matalataajuuksiset resonoinnit.

2.1.2 Analyysit eksplisiittisellä laskentamenetelmällä

Eksplisiittisessä laskentamenetelmässä kaava 1 muunnetaan kaavassa 2 kerrottuun muotoon. Tästä yhtälöstä voidaan kiihtyvyydet helposti ratkaista diagonaalisen massamatriisin avulla. Näin eliminoidaan tarve laatia ja kääntää matriiseja koska yhtälöt eivät ole kytkettyjä yhteen (vrt. implisiittinen menetelmä). Koska koko systeemin tasapainoa ei tarvitse ratkaista, on eksplisiittinen menetelmä hyvin sovelias sellaisten laskentaongelmien ratkaisuun, joissa tasapainoa ei usein edes ole. (Jacob & Goulding 2002, 3-4.)

$$[M]\{\ddot{x}\} = \{f_{ex}\} - [K]\{x\} = \{f_{ex}\} - \{f_{in}\} \quad (2)$$

$[M]$ = systeemin massamatriisi

$\{\ddot{x}\}$ = solmujen kiihtyvyyksivektorit

$[K]$ = systeemin jäykkymatriisi

$\{x\}$ = solmujen siirtymävektorit

$\{f_{ex}\}$ = ulkoisten voimien vektorit

$\{f_{in}\}$ = sisäisten solmuvoimien vektorit

Auton koreja suunniteltaessa eksplisiittistä laskentamenetelmää käytetään pääosin auton kolarikäyttäytymisen kehittämiseen. Tällaisessa suunnittelussa ei usein tutkita pelkästään korin rakenteiden muodon muuttumista kolarissa vaan myös miten korin kokoonpuristumista voitaisiin suunnitella sellaiseksi, että matkustajat loukkaantuisivat mahdollisimman vähän. Toinen optimoinnin kohde tässä yhteydessä usein on auton vakuutusluokkamääritys. Välillisesti eksplisiittistä laskentamenetelmää auton korien suunnittelussa käytetään korin peltiosien valmistuksen syvävetoprosessien suunnittelussa.

Auton kolaritestauksen (ja sitä kautta matkustajien loukkaantumisalttiuden) merkittävimmät vaikuttajat ovat turvallisuusvirastot ja usein riippumattomat tiede- tutkimus- ja kuluttajaorganisaatiot. Merkittävimmät edellämainituista organisaatioista ovat USA:n The National Highway Traffic Safety Administration ja sen Federal Motor Vehicle Safety (FMVSS) –standardit, USA:n The Insurance Institute for Highway Safety – highway Loss Data Institute (IIHS-HLDI) ja Euroopan Euro NCAP omine standardoituine testeineen.

Auton matkustajien mahdollista loukkaantumista eksplisiittisissä virtuaalikolaritesteissä tutkitaan sisällyttämällä laskentamalliin virtuaali-ihmisiä (virtual crash test dummy). Nämä ovat eri organisaatioiden laatimia virtuaalisia vastineita fyysisistä

kolarinukeista (ja nämä taas pyrkivät olemaan vastineita oikeista ihmisistä). Tunnetuimpia näillä virtuaali-ihmisillä tai niiden osilla tehtävä tutkimuksia on Head Injury Criterion (HIC) –määritys. HIC-arvo ennakoi päävamman syntymisen todennäköisyyttä pään erilaisilla hidastuvuuksilla.

Yleisimmin tehdyt eksplisiittiset virtuaalitestit autolle ovat erilaiset etutörmäykset, takatörmäykset, sivutörmäykset ja ympäriajotesti (katon kokoonpaineaminen). Erilaisia variaatioita näistä testeistä ovat määritelleet FMVSS, IIHS-HLDI ja EuroNCAP.

Edellisessä kappaleessa mainituissa törmäystesteissä auto tai siihen iskeytyvä kappale liikkuvat suhteellisen suurella nopeudella. Näiden testien lisäksi autot testataan myös suhteellisen hitaalla törmäysnopeudella (15 km/h) vakuutusluokan määrittelymiseksi. Tämän Danner-testisarjan (testien kehittäjä on Max Danner) avulla tutkitaan kuinka kalliiksi auton korjaaminen tulee hitaiden keulaan tai perään kohdistuvien törmäysten jälkeen.

Auton korin peltiosiin tavallaan liittyvä virtuaalitestauksen alue ovat myös syvävetosimulaatiot. Eksplisiittisen laskentamenetelmän avulla tutkitaan millaiset syvävetotyökalujen painimet ja vastintyökalut sekä niiden liikeradat ja -nopeudet tulisivat olla, jotta halutunmuotoinen (ja paksuinen) peltiosa saataisiin aikaiseksi.

2.1.3 Laskentamenetelmän valinta

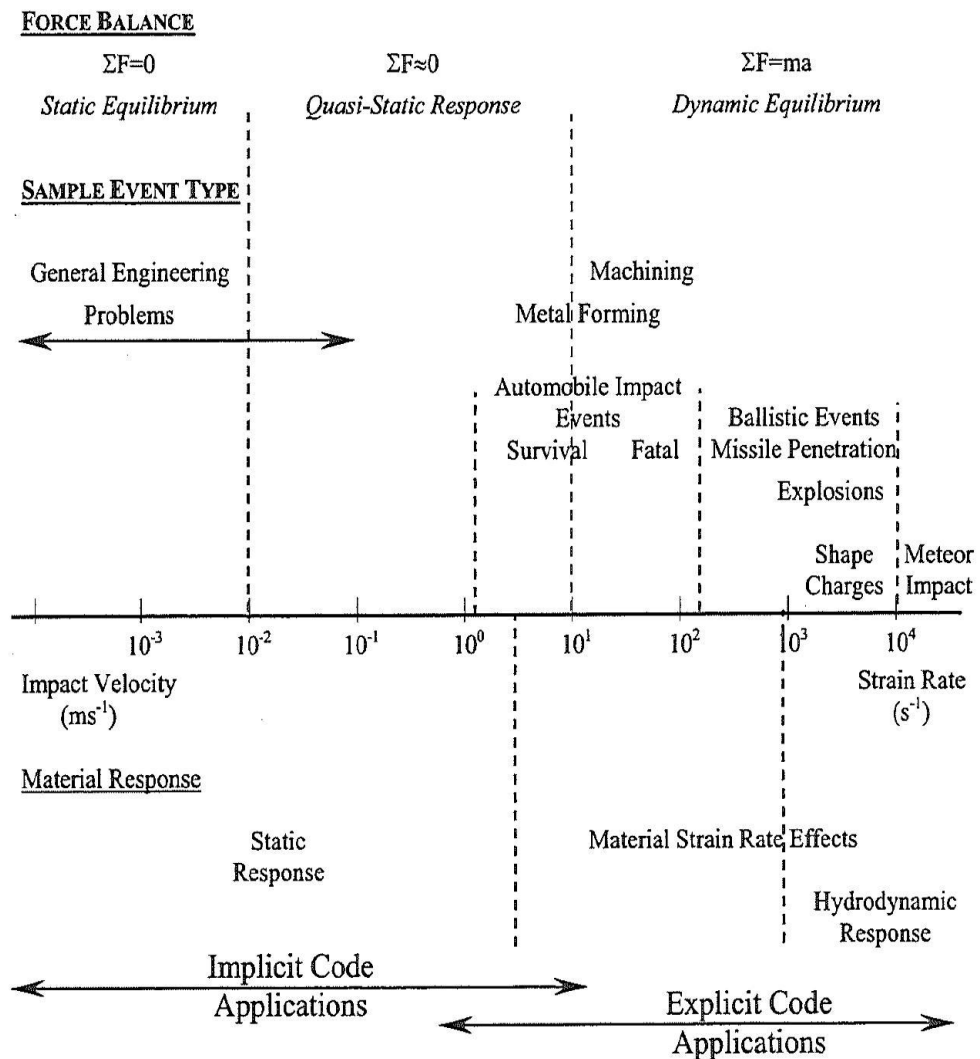
Auton korien kehittämistyössä yleensä on selvää, käytetäänkö analyysien laskennassa implisiittistä vai eksplisiittistä menetelmää. Yleisperiaatteena on yleensä se, että implisiittistä menetelmää käytetään silloin, kun halutaan tietää kappaleeseen syntyviä kimmoisen alueen jännityksiä ja muodonmuutoksia sekä värähtelyjä. Eksplisiittistä menetelmää käytetään tutkittaessa suuria muodonmuutoksia (materiaalin venymisen alueella, joka ulottuu materiaalin murtumiseen asti). Kuitenkin edellä mainittiin, että on sellaisia analysoitavia ongelmia joille sopii kumpikin menetelmä. Tässä tutkimuksessa esiintyvä ympäriajotestiin liittyvä avoauton A-pilarin painaminen on sellainen, jolle molemmat menetelmät soveltuvat (Schweizerhof et al. 1999, 17).

Laskentaongelmien alue, jolle molemmat laskentamenetelmät sopivat, on kerrottu kuvassa 2.1.3.1. Tämä alue on kuvassa keskellä oleva vyöhyke, joka koskee näennäisstaattisia (quasi-static) ilmiöitä. Näennäisstaattisella alueella kappaleeseen kohdistetaan ajan suhteen muuttuva voima, jota ei ilmiönä voida pitää täysin staattisena laskentatapauksena. Voiman muutosnopeus on kuitenkin sen verran pieni, että laskennan aikajaksojen (time steps) kohdalla ulkoisten ja sisäisten voimien tasapaino pystytään laskemaan ja uusi jäykkyyismatriisi muodostamaan (implisiittinen epälineaarinen laskenta).

Eksplisiittisellä menetelmällä näennäisstaattiset laskennat voidaan suorittaa määrittämällä voiman vaikutusta nopeammaksi. Eksplisiittiselle menetelmälle on epäedullista hitaasti muuttuva voima tai esimerkiksi ympäriajotestiin liittyvä A-pilarin suhteellisen hidas painaminen levyllä. Tällaisen suhteellisen pitkäkestoisen ilmiön laskenta eksplisiittisellä menetelmällä voi kestää sietämättömän pitkään (Schweizerhof et al. 1999, 10). Eksplisiittisessä analyysissä tämä ongelma voidaan kiertää nopeuttamalla voiman vaikutusnopeutta, jolloin laskenta nopeutuu.

Voiman vaikutusnopeutta ei voida kuitenkaan määräämättömästi lisätä, koska tällöin kappaleeseen tulevat muodonmuutokset eivät enää vastaa hitaalla testillä tehtyä sekä laskennassa joudutaan mallin epävakauden lisääntymisen vuoksi suorittamaan massakaalausta (mass scaling) ja lisäämään elementtien tiimalasiutumista (hourglassig) ehkäisevää viskoosi- tai jäykkyysvaimennusta (viscous or stiffness control). Schweizerhof et al. (1999, 14) mukaan ympäriajotestin simuloinnissa eksplisiittisellä testillä saatiin hyviä tuloksia paininlevyn liikkua 200 tai 2000 mm/s. Sen sijaan 10 000 mm/s liikenopeudella laskenta oli epävakaampaa ja malliin syntyneet muodonmuutokset poikkesivat merkittävästi kahdella hitaammalla tavalla lasketuista.

Näennäisstaattisten ilmiöiden tutkimiseen soveltuvat siis sekä implisiittinen että eksplisiittinen menetelmä. Implisiittisen menetelmän heikkouksia tällä alueella ovat suurten elementtimallien vaatimat suuret tietokoneressurssit sekä ratkaisijaohjelmien rajoitukset. Eksplisiittisen menetelmän etuja tällä laskennan saralla taas ovat pienempi datan varastointitarve, laskentakoodin parempi soveltuvuus yhtäaikaaisesti useammalle tietokoneelle (parallel computing) sekä parempi kontaktitilanteiden hallinta. (Schweizerhof et al. 1999, 4-5.)



Kuva 2.1.3.1. Implisiittisen ja eksplisiittisen menetelmän käyttöalueet (Implicit Code & Explicit Code Applications). (Jacob & Goulding 2002, 7.) Impact velocity = törmäysnopeus, strain rate = muodonmuutosnopeus.

2.2 Auton korin FE-mallin rakentamisen vaiheet yleisesti

Auton korin elementtimallin rakentamisessa on yleisiä vaiheita riippumatta siitä millaisia analyysejä mallilla olisi tarkoitus tehdä. Auton koreista on nykyään yleensä aina tehty pintamallit mutta joissain erikoistapauksissa malli pitää laatia aivan alusta asti oikeaa koria mittaamalla tai osista on CAD-datana vain osien ääriiviivoja kuvaava-

vat rautalankamallit. Seuraavana kuvataan, miten elementtiverkko yleisesti tehdään eri vaiheissa.

2.2.1 Rautalankamallin pinnoittaminen

Monista tutkitun ajoneuvon peltiosista ei ollut työn tekohetkellä saatavilla pintamalleja. Näistä osista oli saatavana vain ns. rautalankamalleja. Rautalankamalleiksi kutsutaan perinteisiä vain viivojen avulla tehtyjä 3D-piirroksia. Rautalankamallit eivät siis sisällä esineen pintaa kuvaavia matemaattisia kuvauksia tai pintaesityksiä kuvaavilla. Nämä saatavilla olleet mallit olivat tutkitun auton kohdalla varsin yksinkertaisia ja antoivat hyvin puutteellisen kuvan kappaleiden todellisista muodoista. Näissä rautalankamalleissa kappaleet olivat pääosin kuvattu vain ääri viivoiltaan ja ääri viivojen välisten alueiden muotokäyriä ei ollut. Kuvassa 2.2.2.1. on esimerkki tutkitun ajoneuvon rautalankamallista.

Kaikki tutkittavan auton korin peltiosista ovat monella tapaa kaarevia ja siksi vain yksittäisen osan ääri viivoja kuvaavat mallit olivat täysin riittämättömiä sellaisen FEmallin tekemiseen, joka seuraa tarkasti osien todellisia muotoja yksityiskohtineen. Tällaisten vain ääri viivojen avulla kuvattujen osien kohdalla turvauduttiin reverse engineeringiin. Osat mitattiin 3D-mittauskoneen avulla. Osat mitattiin mittaustasolla ja mittakoneen antamat koordinaattipisteet siirrettiin CAD-datana 3D-rautalankamallikuvaan. Ääri viivojen, mittaamalla saatujen mittapistepilvien ja osista otettujen valokuvien avulla saatiin sitten tehtyä 3D-CAD-ohjelmien ja FE-esikäsitelijäohjelman avulla pintamallit peltiosista. Pintamallien avulla saatiin tehtyä osaa kuvaava elementtiverkko. Tästä lisää jäljempänä.

Pintamallien rakentaminen kappaletta kuvaavien ääri viivojen ja mittapistepilvien avulla on hidasta. Eri tietokoneohjelmien ominaisuudet ja mahdollisuudet tehdä pintamalleja vaihtelevat varsin paljon ja ohjelman tarjoamien mahdollisuuksien mukaan pitää valita eri mallinnustekniikoita. Yksinkertaisemmissa ohjelmissa pinta saadaan luotua vain kahden käyrän tai kolmen ja neljän päistään toisiaan leikkaavan käyrän väliin. Monipuolisemmissa ohjelmissa pinta voidaan ikään kuin pingottaa kahden toisista erillään olevan käyrän väliin ja pinnan keskiosia voidaan liikuttaa kohti todenmukaisempaa asemaa mittapisteidien tai korkeusasemakäyrien avulla. Yksinkertaisemmissa ohjelmissa aikaansaatuja ”pintalappuja” ei voi liittää toisiinsa (saadak-

seen aikaan yhden isomman ”pintalapun”). Monipuolisempi ohjelma hallitsee tämänkin ja useista pintalapuista saadaan koostettuja suurempia yhtenäisiä pintoja. Samalla kun ohjelma yhdistää pintalappuja, voidaan niiden yhteenliittymien sulavuutta ohjata ohjelman erilaisilla approksimointityökaluilla.

Myös osien mittauksissa saatujen mittapisteiden määrä ja sijainti vaikuttavat paljon rakentamisen nopeuteen ja lopputuloksen laatuun. Periaatteessa pintamallista saadaan sitä tarkempi mitä enemmän mittapisteitä pinnalta on mitattu. Käytännön kokemus osoitti, että mittapisteet kannattaa mitata kappaleen pinnalta jonossa siten, että ne suunnilleen sijaitsevat samalla auton pituus- tai poikittaissuuntaisella kappaletta leikkaavalla tasolla. Tällaisia vierekkäin ketjussa olevia pisteitä voidaan valita niiden kautta kulkevan käyrän pisteiksi ja näistä koostettuja käyriä voidaan taas valita pintalappujen reunakäyriksi tai keskialueiden korkeusasemakäyriksi.

Kun pintamalleja laaditaan mitattujen pisteiden avulla, on hyvin tärkeää huomata, että 3D-mittauskoneiden luonteen vuoksi mittapisteet ovat tulleet mitatuksi pinnalta. Tällaisten mittapisteiden avulla mallinnetuista pinnoista tulee kappaleen ulkopinta. Ajoneuvojen korien analyyseissä käytetään yleensä kuitenkin aina malleja, jotka kuvaavat peltiosan paksuuden keskikohtaa. On myös tarkasti tutkittava mitä kappaleen (paksuuden) kohtaa mahdollisesti annetut valmiit äärioviivat (rautalankamalli) kuvaavat ja on tehtävä tarvittaessa niiden sijainnin korjaus. Lopuksi kun mittapisteiden avulla on saatu mallinnettua kappaleen jompikumpi pinta, pitää tämä pintamalli mallinnusohjelman avulla asemoida pinnan gradienttien suunnassa osan paksuuden keskikohtaan eli siirto/kutistus/laajennus pitää tehdä puolikkaan aineenpaksuuden verran kohti kappaleen paksuuden keskikohtaa. Näin uudelleenasemoidun pinnan ääridimensiot on syytä vielä tarkistaa, jotta ne eivät pienentyneet tai laajentuneet.

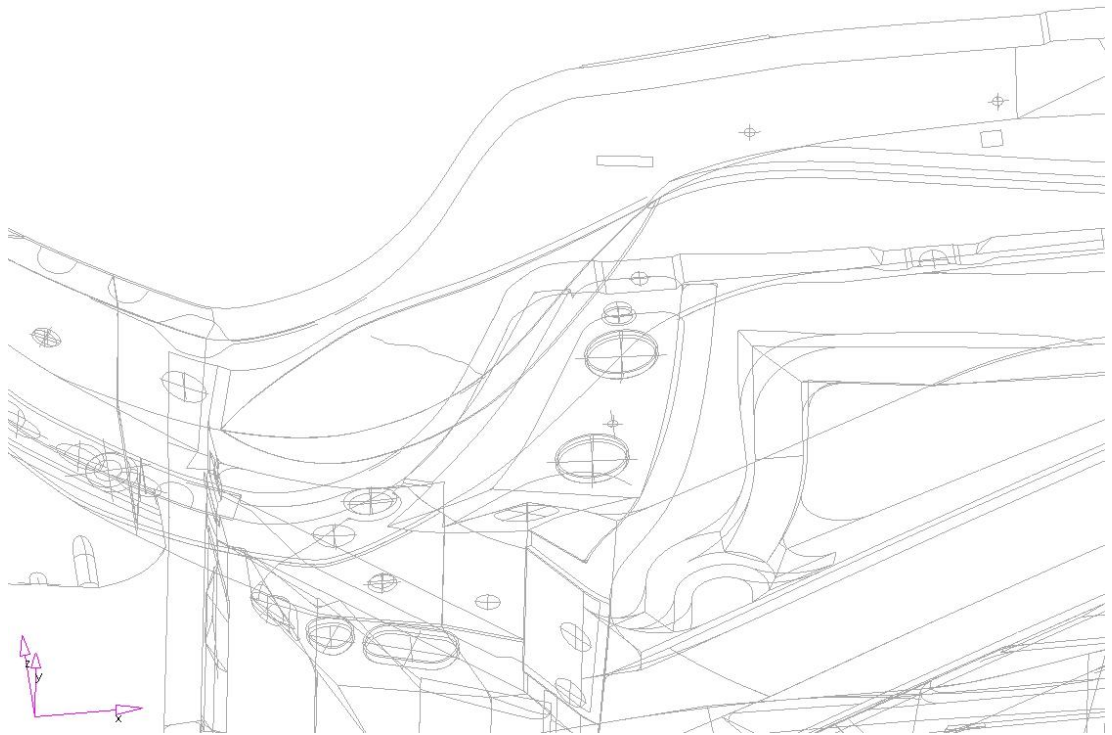
Pienempien pintalappujen parven yhdistäminen ohjelmallisesti kannattaa tehdä tulevaa FE-mallin rakentamista helpottamaan. Tämä ensinnäkin siksi, että FE-mallinnusohjelmissa yleensä pintamalli ja sen avulla aikaansaatu elementtiverkko ovat yhteydessä toisiinsa. Ne ovat ikään kuin liimaantuneet yhteen ja osan verkotuskäskyn voi tehdä valitsemalla osaa kuvaavan pintamallin. Jos koko kappale muodostuu vain yhdestä pinnasta, ohjelma verkottaa parhaimmillaan vain yhdellä valinnalla

ja käskyllä koko osan. Tavoitteena yleensä aina on saada yhden peltiosan kaikki pintalaput yhdistettyä toisiinsa siten, että koko kappale on vain yksi ainoa pintamalli.

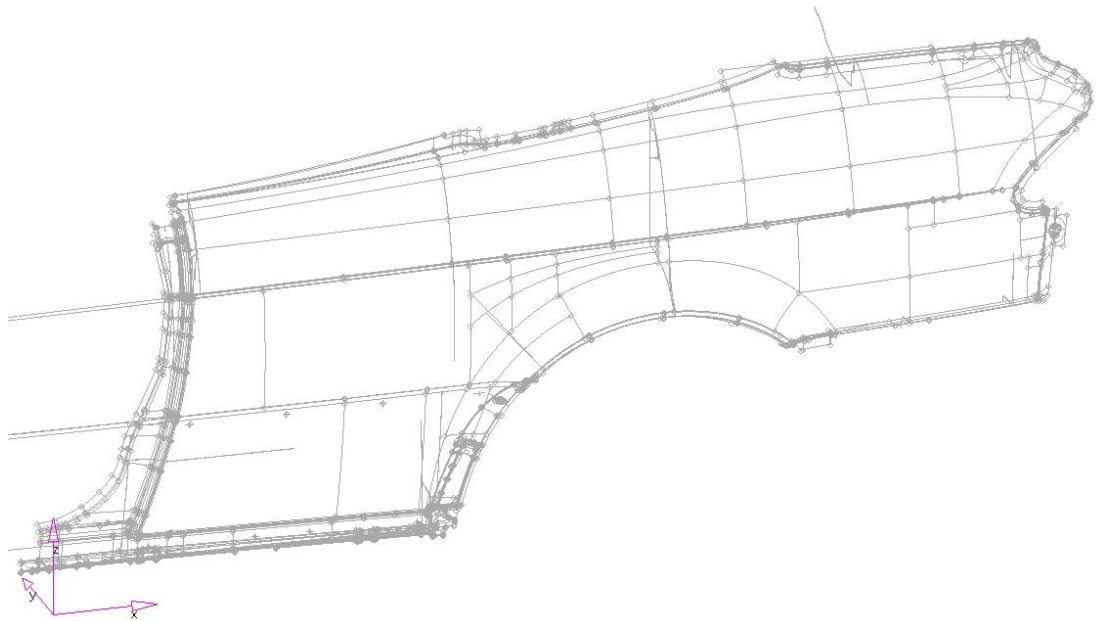
Autojen peltiosat ovat yleensä erittäin monimuotoisia. Yhdessä osassa voi olla suuria tasaisia alueita, pieniä ja teräviä taitteita ja yksityiskohtia, reikiä, aukkoja, kiinnityskohtia jne. Aikaansaadut pintalaput kannattaa yhdistää toisiinsa mutta sekä mahdollinen ääri viivoja kuvaava rautalankamalli sekä pintalappujen alkuperäiset rautalankaääriviivat kannattaa jättää malliin. Näiden viivojen ja käyrien avulla voi ohjelmallisesti kätevästi määrittellä tarkempien alueiden mahdollisesti tiheämpää ja tasajakoisempaa solmutusta (FE-elementtien solmuja). Tyypillisimpiä esimerkkejä tällaisesta tarpeesta ovat pistehitsattavat ja/tai yhteenliimattavat kiinnityslaippa-alueet, terävien taitteiden yksityiskohtaiset alueet sekä reiät. Rautalankaääriviivojen avulla voidaan myös ohjelmallisesti leikata pintalappuja tarvittaessa oikean kokoiseksi.

Pintamallinnusohjelmat määrittelevät yksittäiselle pintalapulle automaattisesti pinnan gradientin suuntaisen suuntavektorin, joka kasvaa jompaankumpaan suuntaan. Ohjelma käyttää tätä suuntaa hyväkseen mm. määritellessään värejä ohjelman varjostusominaisuutta varten. FE-mallinnusohjelma taas käyttää tätä samaa pintamallin suuntavektoria ja sen kasvusuuntaa määritellessään jokaiselle ko. pintamallin avulla luoduille kuorielementille oman samantapaisen suuntavektorin. Kuvassa 2.2.2.3. on kappaleen keskiosalla suuri pintalappu, jonka edellä mainittu suuntavektori on eri suuntaan kuin kaikkien naapuriensa. Tämän vuoksi ohjelma varjostaa kyseisen pintalapun väärin ja näyttää sen olevan varjossa (kuvassa mustana). Tämän lapun suuntavektori käännetään ohjelmassa oikeaan suuntaan ja sen jälkeen varjostus näkyy oikein. Pintojen sekä niiden avulla tehtyjen elementtien suuntavektorien suunnan tarkastaminen on tärkeä tehtävä. Elementtimenetelmälaskelmissa analyysi ei välttämättä onnistu, jos samassa kappaleessa on elementtejä, joiden suuntavektori on eri suunnassa naapurielementtien kanssa. Suuntavektori määrittää elementin solmujen numerointijärjestyksen ja virhe yksittäisen elementin numerointijärjestyksessä estää tai haittaa laskennan suorittamista.

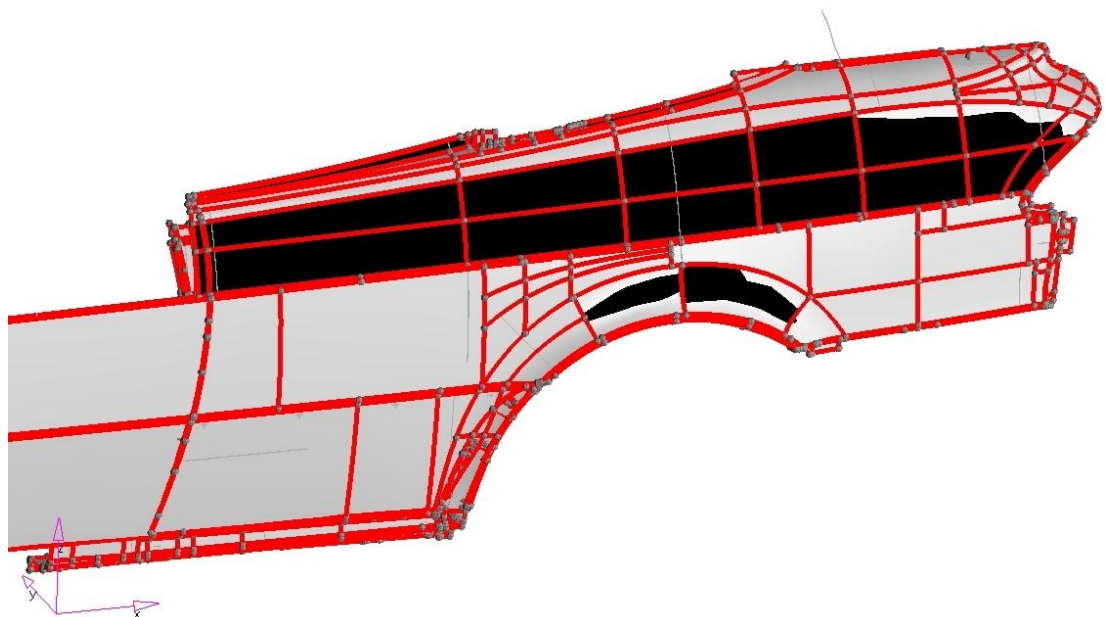
Kätevä periaate pintojen (ja elementtienkin) suuntavektorien määrittämisessä on ohjata vektori kasvamaan auton sisältä ulospäin. Pinnan gradientin suuntaiset suuntavektorit saadaan tarkistusta varten näkyviin ohjelmalla ja kun vektorit osoittavat pinnoista ulospäin, näyttää auto siltä, kuin auringonsäteet lähtisivät siitä tai auto näyttää aivan siililtä. Elementtejä on autojen korien malleissa usein satojatuhansia, jopa miljoonia ja yksittäisiä väärään suuntaan osoittavia suuntavektoreita on usein vaikea havaita. Toistaiseksi oikeastaan ainoa keino on tarkastaa silmämääräisesti jokainen osa erikseen.



Kuva 2.2.2.1. Rautalankamalli oikean etupään kynnyksen ja lattian alueesta.



Kuva 2.2.2.2. Vasemman takalokasuojan pintamalli rautalankamalleineen lähes valmiina.



Kuva 2.2.2.3. Sama kuin edellinen mutta pintalaput varjostettuna.

Nykyään pelkät rautalankamallit autojen peltiosia kuvaamaan ovat hyvin harvinaisia ja käytännössä auton korien kehitystyö tehdään tänä päivänä aivan alusta loppuun

pintamallinnusta käyttämällä. Autojen muotoilijat ehkä tekevät vielä ideointia paperille hahmottelemalla mutta lopuksi yleensä hekin tekevät itse auton ulkokuoren pintamallinnuksen monipuolisilla pintamallinnusohjelmilla. Insinööriosaston tehtävänä on yksittäisten peltiosien mallintaminen noiden muotoilijan tekemien pintamallien pohjalta.

2.2.2 Elementtiverkon rakentaminen pintamallien avulla

Kappaletta kuvaava elementtiverkko voidaan laatia rautalankamallin ja korkeuskäyrien avulla (samoin kuin pintamallien rakentaminen) mutta käytännöllisintä elementtiverkko on rakentaa pintamallien avulla. FEM-verkotus- eli esikäsittelijäohjelmissa on helpointa valita koko osaa kuvaava pintamalli ja käskää verkottaa se. Tällä hetkellä autonsuunnitteluteollisuudessa elementtiverkotukset tehdään käytännössä aina pintamallien avulla. Tässäkin kohtaa on myös muistettava, että yleisesti elementtiverkko tulisi sijoittaa osan paksuuden keskikohdassa. Tämä asia on helposti kunnossa, jos verkotettavaksi valittu pintamalli on laadittu valmiiksi paksuuden keskikohtaan.

Kun tehdään autonkorista FEM-mallia, täytyy pitää mielessä tietty rakentamisjärjestys. Kokemus on osittanut, että nopeimmin koko auton korin (Body-In-White) malli saadaan aikaiseksi, kun verkotustyö aloitetaan alueilta, joissa osat liittyvät toisiinsa. Pääasiassa nämä alueet ovat pistehitsattavia laippaliitoksia eli ”flenssejä” (englanniksi: laippa = flange). Korin eri peltiosat liitetään FEM-mallissa liitoselementeillä, joilla yritetään mallintaa tapaa, jolla laipat on liitetty toisiinsa (yleensä pistehitsaus). Jotta liitoselementtien rakentaminen malliin olisi mahdollisimman nopeaa, on edullista, että kahden toisiinsa liitettävän osan laipoissa olisi vierekkäin samalla kohdalla mahdollisimman identtinen verkotus. Liitosalueiden verkotusta käsitellään tarkemmin jäljempänä. Kun laippa-alueiden verkotus on saatu tehtyä, on peltiosan muiden alueiden mallinnus jonkin verran vapaampaa. Samassa osassa olevien laippa-alueiden ulkopuoliset alueet verkotetaan siten, että verkon käsketään tarttumaan jo valmiiksi verkotettujen laippa-alueiden verkkoihin.

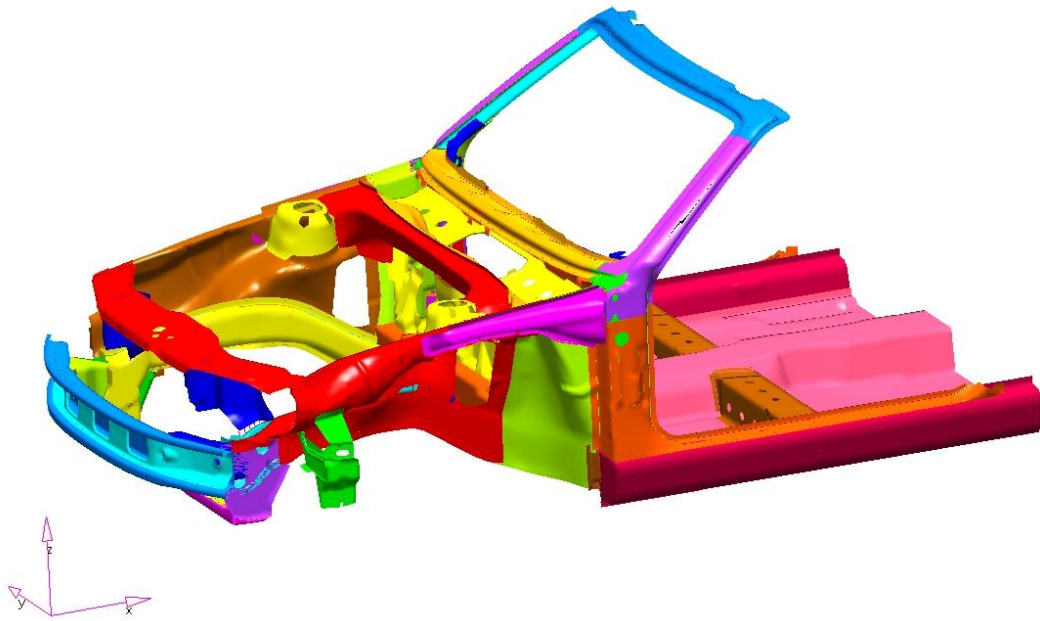
Käytännössä helpoin tapa saada laippa-alueen verkko sekä sen ulkopuolisen alueen verkot liittymään jouheasti toisiinsa on näiden alueiden välisen rajakäyrä solmutta-

minen etukäteen. Tämä tarkoittaa sitä, että esikäsittelijässä valitaan tämä rajakäyrä ja käsketään tehdä siihen elementtien solmuja tietyin välimatkoin. Sitten kun tämä raja- viiva on solmutettu, voidaan sekä laippa-alueen verkotuksen että ympäröivän alueen verkotuksen tarttua näihin solmuihin. Moderneissa esikäsittelijäohjelmissa voidaan itse asiassa aivan mikä tahansa pinnalla tai sen reunassa sijaitseva käyrä solmuttaa erikseen ja määrittellä pintaan tehtävä verkko tarttumaan näihin solmuihin. Tällä tavalla saadaan helposti esim. tiheämpää tai harvempaa verkkoa halutuille alueille.

Suorareunaisista elementeistä ei pysty laatimaan aivan tarkkaa mallia auton peltiosista. Elementtimenetelmän pinta- ja tilavuuselementit ovat aina suorareunaisia. Suora reuna muodostuu elementin solmujen välisistä suorista yhdysviivoista. Auton korin peltiosat taas ovat yleensä kaarevia, jolloin suorareunaiset elementit seuraavat karkeammin pellin muotoja. Mitä tiheämpi FEM-verkko on (pienemmät elementit) sitä tarkemmin verkko muistuttaa geometrialtaan kaarevaa pintamallia.

Moderneissa esikäsittelyohjelmissa FEM-verkkoa pystyy projisoimaan pintamallin päälle. Jos jostain syystä FEM-verkko on irti pintamallista (kauempana erillään siitä), voidaan verkko projisoida tai paremminkin käskää tarttumaan lähellä olevaan pintamalliin. Projisointi tapahtuu yleensä pinnan gradienttien suuntaisesti. Tällainen projisointitilanne tulee esiin esim. silloin kun hyvin karkeaa (suurista elementeistä laadittua) verkkoa tihennetään joltain alueella. Karkeista elementeistä tihennetty verkko seuraa karkean verkon alkuperäistä geometriaa ja tällaisissa tilanteissa kannattaa käskää tämän uuden verkon tarttua uudestaan pintamalliin. Tällöin elementtiverkon geometriavastaavuus pintamallin kanssa paranee.

Eri peltiosia kuvaavat elementtiverkot kannattaa tehdä erivärisiksi. Kätevä tapa on asettaa samanpaksuisille osille ja samasta materiaalista tehdyille sama väri (jos osien paksuus tiedetään, eikä se ole optimoinnin kohde). Tällöin pystytään jo nopealla vilkaisulla havaitsemaan, paljonko koko mallissa on erilaisia osia. Näin myös eri osien liittymäkohdat on helpompaa havaita. Samaa värimäärittystä kannattaa kokemuksen mukaan käyttää sekä pintamalleissa että niihin liittyvissä elementtiverkoissa.



Kuva 2.2.2.1. Värien käyttöä eri peltiosien elementtiverkoissa.

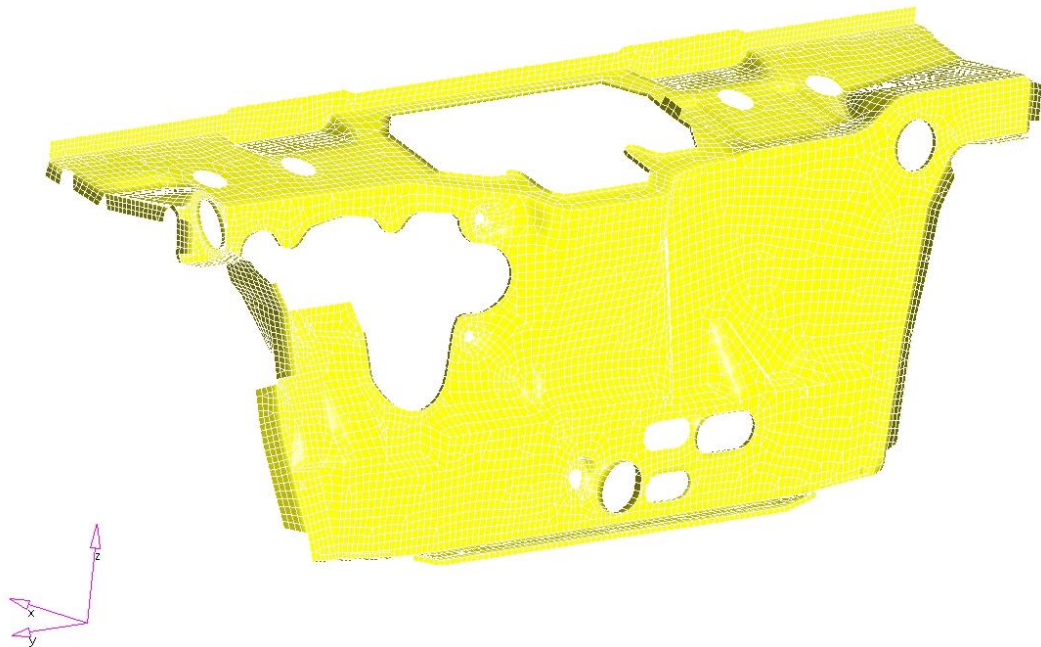
2.2.3 Symmetrian hyväksikäyttö

Monissa FEM-analyyseissä (esim. taipuman laskenta) on mahdollista käyttää tutkitavan kappaleen symmetriaa hyväksi. Pääasiallinen hyöty symmetrian hyväksikäytöstä tulee siinä, että koko kappaleesta ei tarvitse tehdä FEM-mallia ja näin säästetään aikaa sekä mallintamisessa että laskennassa. Symmetriaa hyväksikäytettäessä mallinnetaan vain puolet tai kaksoissymmetrisissä kappaleissa jopa vain yksi kahdeksasosa kappaleesta. Kappale saadaan analyysissä käyttäytymään kokonaisen kappaleen tavoin sopivilla kiinnitys- ja rajaehdoilla. Näillä rajaehdoilla (esim. sallitut solmujen liikesuunnat) saadaan analyysi ottamaan huomioon symmetriatason toisella puolellakin oleva kappaleen osa, vaikka sitä ei olekaan mallinnettu. Kun käytetään symmetriaa hyväksi, on kiinnitys- ja muiden rajaehdot tehtävä ajatuksella ja oltava varma siitä, että valitut reunaehdot aikaansaavat kappaleen käyttäytymisen koko kappaleen tavoin. (A Finite Element Primer 1986, 115-123.)

Autojen korien FEM-analyyseissä symmetriaa ei useinkaan voida käyttää ainakaan laskennassa hyväksi, koska korit eivät juuri koskaan ole symmetrisiä. Auton korit

voivat olla nopeasti vilkaistuna symmetrisiä pituusakselinsa suhteen mutta suurimmat poikkeavuudet symmetrisyydessä ovat rintapellissä ja pohjalevyssä (lattiassa). Ohjauslaitteita varten on yleensä tehty rintapeltiin aukot ja tämän aukon sijainti vaihtelee sen mukaan kummanpuoleiseen liikenteeseen auto on tarkoitettu. Pohjalevyssä on taas usein epäsymmetrisesti sijoitettuna erilaisia kaapelikanavia, pakoputken kannakkeita ja tilaa esim. nelivedon akselirakenteille.

Havaintojen mukaan autojen koreista ja pintapelleistä (tai muoveista) on mallinnettu vain auton toinen puoli jos kappale on symmetrinen tai sama kappale löytyy peilikuvana auton toiselta puolelta. Tällöin symmetriaa voi käyttää hyväksi elementtiverkkoja tehtäessä siten, että toisella puolella olevaan osaan tehty verkko voidaan kopioida peilaamalla toiselle puolelle. Tämä säästää mallintamisajassa huomattavasti. Kun elementtiverkko kopioidaan peilaamalla toiselle puolelle, on ehdottomasti tarkistettava, että tuloksena saadun verkon elementtien suuntavektorit ovat mielekkääseen suuntaan (kts. luku 2.2.1).



Kuva 4.6.1. Rintapelti, jossa aukot ja monet muutkin muodot sijaitsevat epäsymmetrisesti.

3 YLEISKÄYTTÖISEN FE-MALLIN RAKENTAMINEN

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli laatia auton korista sellainen elementtimenetelmämalli, joka olisi mahdollisimman monikäyttöinen sekä nopeasti muokattavissa erilaisia analyysejä varten. Rakennettavan elementtimenetelmämallin tulisi olla mahdollisimman helposti käytettävissä ainakin korin taivutus- ja vääntöjäykkyyden tutkimiseen, ominaistajuus- ja pakkovärähtelytutkimuksiin, ympäriajotestiin sekä erilaisiin kolaritesteihin. Mallin rakentamisen aika tulisi olla mahdollisimman lyhyt. Aikaansaadulla mallilla tehtyjen erilaisten analyyseiden tulisi tarvita myös mahdollisimman vähän tietokoneresursseja sekä laskenta-ajat tulisivat olla lyhyet. Nämä kaikki edellä mainitut vaatimukset ovat jossain määrin keskenään ristiriitaisia. Näiden ristiriitaisten vaatimusten optimoinnista kerrotaan seuraavissa kappaleissa.

3.1 Elementtityyppien valinta

Elementtityyppien valinta auton korin mahdollisimman yleiskäyttöiseen FEM-malliin on hyvin tärkeä prosessi. Tässä elementtityypin valinnalla tarkoitetaan elementtien muodon ja solmumäärien valintaa eikä niinkään niiden matemaattisen käyttäytymismallin valintaa. Toisaalta vaatimukset eri analyyseiden elementtien muodoille tulevat juuri valittujen matemaattisten käyttäytymismallien vaatimuksista ja rajoituksista.

Elementtityypin valinnalla on merkitystä koko FEM-analyysin tekemisen ketjussa. Elementtityypin valinnalla on eniten merkitystä mallintamiseen kuluvaan aikaan, analyyseiden laskenta-aikaan, saatujen tulosten tarkkuuksiin (realistisuuteen) sekä tulosten esittämisen mahdollisuuksiin.

Elementtityyppejä on paljon, 1D-, 2D- ja 3D-elementtien kirjo on hyvin laaja. Suurinta osaa koko tästä kirjosta ei kuitenkaan tarvita kokonaisuudessa yleiskäyttöisessä auton korin elementtimallissa. Auton kori on yleensä valmistettu ohuista peltiosista, joiden paksuus yleisimmin ulkopelleissä on 0,8 mm ja piiloon jäävissä sisäpelleissä 1,2 mm. Paksuimmatkin osat ovat yleensä n. 4 mm paksuja. Tämä tarkoittaa sitä, että korin mallintamisessa pitäydytään pääosin kuorielementeissä. Kuorielementeillä ei

elementtiverkossa ole ollenkaan paksuutta ja paksuusmääritys niille tehdään vasta elementin matemaattisen käyttäytymismallin valinnan yhteydessä.

Elementtimallit voitaisiin esikäsittelijäohjelman avulla periaatteessa laatia aivan millaisista elementtiyhdistelmistä tahansa. Erilaisia elementtityyppejä tulee sijoittaa samaan malliin kuitenkin vain niin, että mallin fyysinen vastaavuus ja toimivuus on mielekäs. Toisiinsa liittyvien elementtien toisistaan poikkeava polynomin aste on teoreettisesti epähyväksyttävää. (Hellen 2003, 6.)

3.1.1 Elementit implisiittisen ratkaisijan analyyseissä

Kuten yllä todettiin, käytetään tutkittavan auton korin mallintamisessa pääosin kuorielementtejä. Kuorielementtejä on tarjolla nelisivuisena ja kolmisivuisena. Näissä elementeissä oleva solmumäärä vaihtelee. Nelisivuisessa elementissä solmumäärä voi olla 4, 8, 9, 12 tai 16. Kolmisivuisen elementin solmumäärä taas voi olla 3, 6 tai 10.

Kolmisivuisilla elementeillä on etuna niiden hyvä soveltuvuus monimutkaisten pintamuotojen kuvaamiseen. Haittana taas kolmisivuisilla elementeillä on niiden heikko suorituskyky jännitysanalyyseissä. Niille ei voi käyttää rajoitetun integroinnin menetelmää (reduced integration), jota usein laskennassa käytetään. Niiltä puuttuvat ns. optimaaliset Gaussin integrointipisteet (Gauss points), jotka taas nelisivuisilla elementeillä ovat. (Hellen 2003, 19, 25, 33.)

Kolmisivuisia elementtejä tulisi välttää yllämainitun perusteella mallin rakentamisessa ja käyttää niitä vain sellaisissa kohdissa, jossa nelisivuinen elementti olisi liian lyhytsivuinen tai sen muotovirhe ylittäisi sallitut rajat (nelikulmion kulma olisi liian jyrkkä tai loiva tai elementti on kieroutunut tasomaisuudesta liikaa). Tällaisia tilanteita, joissa kolmisivuisia elementtejä voidaan tarvita, esiintyy useimmin pienten reikien ympäristöä tai levymäisten osien jyrkkäkulmaisia kulmia verkotettaessa.

Koko auton korin mallin peltiosat mallinnetaan siis pääosin nelisivuisilla elementeillä ja vain aivan pienimmissä yksityiskohdissa käytetään tarvittaessa apuna kolmisivuisia elementtejä. Nelisivuisia elementtejä on kuitenkin tarjolla monella eri

solmumäärällä. Teoriassa suuremman solmumäärän elementti mahdollistaa laskennan onnistumisen, vaikka elementin muoto ei olisi aivan täydellinen. Ainoastaan nelisolmuista nelikulmioelementtiä käytettäessä kuitenkin saadaan käytännössä identtiset tulokset, kun huolehditaan, että elementeissä ei ole liikaa muotovirhettä ja tarvittaessa tehdään tiheämpi elementtiverkko.

Vain nelisolmuisten nelikulmioelementtien käyttöä puolustaa voimakkaasti myös se seikka, että mallinnustyö on niitä käyttäen helpompaa ja nopeampaa tehdä. Tehtäessä monimutkaisten pintojen mallinnusta muilla kuin nelisolmuisilla elementeillä, on paljon vaikeampaa varmistaa, että kaikki elementin solmut ovat vierekkäisen elementin solmuissa aidosti kiinni. Joskus elementtien solmuja joudutaan esikäsittelijäohjelmassa liittämään toisiinsa käsin. Tällöin esimerkiksi kahdeksansolmuisen elementin liittäminen vastaavaan naapuriinsa on kaksinkertainen työ verrattuna nelisolmuiseen elementtiin.

Osien liittämiset yhteen voitaisiin tehdä ilma elementtejä liittämällä vierekkäisten osien solmuja yhteen. Yleisin tapa kuitenkin on liittää osat mm. pistehitsauskohdista joko 1D-elementeillä tai tilavuuselementillä (solidielementti). Periaatteessa liittämisen voisi tehdä kuorielementtejäkin käyttäen mutta rinnakkain liitettävien osien (kuten auton peltien liitokset yleensä aina ovat) yhteydessä se on hyvin harvinaista. Tässä työssä osiin liittämiseksi käytetään kaksisolmuisia 1D-elementtejä, joille voidaan laskentaparametreja määrittäessä antaa halutut ominaisuudet.

3.1.2 Elementit eksplisiittisen ratkaisijan analyyseissä

Elementtityyppien valinnassa koko autonkorin eksplisiittisen laskentamenetelmän analyysejä varten pätevät pääasiassa samat huomiot kuin implisiittisessäkin menetelmässä.

Jälleen tässäkin kolmioelementtien käyttöä on vältettävä. Kolmisivuisen elementti on 50 % jäykempi vastustamaan leikkausta tasossa. On testattu, että kun koko auton keulaa kuvaava elementtimalli konvertoitiin nelisivuisista elementeistä kolmisivuisiksi (jakamalla eli katkaisemalla nelisivuiset elementit kahtia kahden vastakkaisen

kulman yhdistävää janaa pitkin), muuttui se n. 30 % jäykemmäksi. Tämä ero on valtava ja ei hyväksyttävissä. (Du Bois 1999, 2/95-96.)

3.2 Elementtien koon valitseminen

Auton korin FEM-analyyseissä elementtiverkon elementtien koolla on vaikutusta mallin rakentamisen nopeuteen, analyysin laskenta-aikaan, tarvittavan muistin ja taltioitavan laskentadatan määrään, laskentatulosten havainnollisuuteen ja tarkkuuteen sekä FEM-mallin muodonmuutoskäyttäytymiseen. Periaate yleensä aina on se, että analyysin tulisi olla niin nopeasti tehtävissä ja ajettavissa kuin mahdollista – kuitenkin siten, että tulokset olisivat niin tarkkoja kuin tarvitaan. Sekä implisiittisessä että eksplisiittisessä laskentatavassa elementin koolla on erilaista merkitystä ja koko korin yleiskäyttöistä mallia tehtäessä joudutaan tekemään tässä suhteessa kompromisseja.

3.2.1 Elementtikoon merkitys implisiittisissä ratkaisijoissa

Implisiittisillä ratkaisijoilla (siis sellaisilla, jossa laskenta pohjautuu rakenteen globaalin jäykkyyso-matriisin käyttöön), laskenta tapahtuu sitä nopeammin mitä vähemmän elementtejä on. Kun halutaan tietää auton korin peltiosaan syntyvä jännitysjakautuma mahdollisimman tarkasti, tarvitaan tutkimusalueelle taas useita pieniä elementtejä. Kun elementtimenetelmä tehdään vain implisiittisen menetelmän analyysiin, kumpaakin em. tarvetta voidaan tyydyttää rakentamalla verkko tiheäksi suurimman mielenkiinnon alueelta ja jättää verkko harvaksi muilta alueilta.

Kun elementtiverkko on harvaa, ovat elementit myös suuria. Kokoa rajoittaa kuitenkin se, että kappaleen geometria pitäisi saada realistisesti kuvattua ja elementeille määritelty paino tulisi kokonaisuudessaan vastata kappaleen painoa. Tasomaisilla kappaleilla geometrian kuvaaminen elementeillä ei ole ongelma mutta pyöreäpintaisilla kappaleilla suorareunaiset elementit voivat oikoa muotoja liikaa.

3.2.2 Elementtikoon merkitys eksplisiittisissä ratkaisijoissa

Eksplisiittisessä analyysissä elementin koolla on jonkin verran erilainen merkitys kuin implisiittisessä analyysissä. Kappaleen käyttäytymisestä saadaan eksplisiittisessä analyysityypissä kyllä myös sitä tarkempaa tietoa mitä pienempiä elementit ovat (eli mitä hienojakoisempi verkko on).

Eksplisiittisessä analyysissä elementin koolla tai tarkemminkin FEM-mallin pienimmän elementin luonteenomaisella pituudella (characteristic length) on merkitystä analyysin laskennan aika-askeleiden (time steps) pituuteen (Jacob & Goulding 2002, 29). Mitä pienempi elementin luonteenomainen pituus on, sitä useammalla aika-askeleella analyysi joudutaan tekemään ja tämä taas tarkoittaa pidentyvää laskenta-aikaa.

Kokonaisilla auton koreilla FEM-analyysejä tekevät yritys- ja tutkimusyhteisöt ovat varsin yhtenäisellä linjalla päättäneet tehdä mallit siten, että kuorielementtien pienin sivu on n. 5 mm pitkä. Tämän viiden millimetrin sivunpituuden käyttäminen on havaittavissa pääosassa viimeisen 13 vuoden aikana tehdyistä autojen korien analyysialan tutkimuksista. Tämä fakta on myös saanut vahvistusta tämän alan koulutus-tilaisuuksissa ja seminaareissa, joissa on ollut mahdollista haastatella asiantuntijoita ympäri maailman. Tässä tutkimuksessa tehdyn mallin kuorielementtien pienimmäksi sivunpituudeksi on valittu myös tämä noin viiden millimetrin pituus.

3.2.3 Elementtikoon merkitys kontaktitilanteissa

Suurten muodonmuutosten analyyseissä tapahtuu usein kontaktitilanteita, joissa osat taipuvat kiinni toisiinsa tai ovat jo valmiiksi kosketuksissa toisiinsa. Elementtien välisiin kontaktitilanteita varten on kehitetty runsaasti erilaisia kontaktialgoritmeja, joiden avulla kontaktitilanne havaitaan ja törmäävästä kappaleesta välittyvä voima välitetään törmättävään kappaleeseen. Esimerkiksi LS-Dyna -ratkaisijaohjelmassa erilaisia kontaktialgoritmeja on tarjolla yli 200 kpl.

Lähestulkoon riippumatta käytettävästä kontaktialgoritmista, olisi mahdollisesti toisiinsa törmäävien osien verkotus oltava varsin samanlaista (sama elementtikoko).

Laskennan aikana mahdollisesti yhteentörmäävissä kahdessa osassa toista suhteellisesti paljon tiheämpi verkko voi tunkeutua karkeammin mallinnetut osan 'verkon silmistä' sisään kauaskin, ennen kuin ohjelma havaitsee kontaktin syntyneen.

Avainsana suurten muodonmuutosten laskennassa on siis elementtikoon homogeenisuus kautta koko mallin. Toisiinsa törmäävien elementtiverkkojen suurin piirtein samanlainen tiheys ehkäisee todellisuudenvastaista tunkeutumista toisen verkon silmistä sisään. Tarpeeksi tiheä ja kauttaaltaan varsin samankokoisella elementtikoolla mallinnetut antaa kontaktitilanelaskelmissa todenmukaisimman vasteen.

3.2.4 Elementtikoon merkitys värähtelyiden laskennassa

Auton koko korin mallilla tutkitaan värähtelyanalyysissä yleensä vain korin alimpia ominaistuuksia ja niiden värähtelymuotoja. Erityisesti avoautoissa korin värähtely on usein selvästi havaittavaa ja siksi värähtelyjen vaimentamiseksi tehdään paljon tutkimustyötä.

FEM-analyysillä saadaan värähtelytaajuuksudet ja värähtelyjen muodot sitä tarkemmin selville mitä pienemmät elementit ovat. Useimmiten tutkittujen alimpien ominaistuuksien aaltomuodot koko korissa ovat kuitenkin aina niin suuria ja loivakulmaisista, että kolaritutkimuksissa tarvittavat elementtien koot (pienet elementit) riittävät paremmin kuin hyvin kuvaamaan värähtelymuotoja.

Jos värähtelyanalyysillä tutkitaan ja kehitetään koripaneelien akustisia ominaisuuksia, tarvitaan tutkittavassa kohteessa mahdollisesti pienempiä elementtejä kuin nuokolarianalyysissä käytetyt viiden millimetri mittaiset elementit. Tuolloin kuitenkin yleensä kyseinen osa analysoidaan erikseen ja sitä varten tehdään aivan oma mallinsa.

3.3 Laajojen tasaisten pintojen mallintaminen

Perinteisesti laajojen tasaisten pintojen mallintamisessa on käytetty suurta elementtikokoa laskennan nopeuttamiseksi (suuri elementtikoko = vähän elementtejä). Laa-

joissa tasaisissa pinnoissa suuri elementtikoko antaakin staattisissa analyyseissä yleensä tarvittavan tarkkuuden ja suurten elementtien käyttäminen tällaisissa kohteissa on perusteltua. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun virtuaalimallin avulla tutkitaan suuria muodonmuutoksia ja ennen kaikkea eri osien törmäämistä toisiinsa. Laajojen pintojen mallintamisessa kontaktitilanteita varten on otettava huomioon asiat, jotka on selitetty kappaleessa 3.2.3.

Kolarianalyyseissä laajat tasaiset pinnat kannattaa myös toisestakin syystä mallintaa tarpeeksi tiheästi. Jos peltiosa rypistyy runsaasti virtuaalitörmäyksessä, tarvitaan tietty elementtimäärä, jotta osan luonnolliset nurjahdusmuodot saataisiin esiin. Törmäyksessä kappaleen verkko voi taipua vain elementtien välistä solmujen yhdysjanan saranaviivaa pitkin. Taipumisen kuvausta edesauttaa myös elementtien mahdollinen pieneneminen niiden kokoonpuristumisen vuoksi. Du Bois (1999, 1.16) viittaa ruotsalaisen Mats Larssonin vuonna 1989 julkaisemaan tutkimukseen, jossa tutkittiin poikkileikkaukseltaan neliön muotoisen teräsputken nurjahtamista päittäispuristuksessa. Putki mallinnettiin pintaelementeillä. Tuon tutkimuksen mukaan nurjahdusmuodot saatiin hyvin esiin, kun käytettiin 16 elementtiä putken pituussuunnassa. Nurjahdusmuodot saatiin kohtuullisesti esiin, kun käytettiin 12 elementillä putken pituudella. Tuota Mats Larssonin alkuperäistä tutkimuksesta kertovaa dokumenttia ei ollut mahdollisuutta saada. Tuon tutkimuksen tuloksista kuitenkin saa hyvän kuvan siitä, kuinka tiheästi laajat tasaiset osat tulisi verkottaa kolaritutkimuksia varten.

3.4 Urien, reikien ja muiden yksityiskohtien mallintaminen

Pienin sallittu elementtikoko määrittelee sen, kuinka pieniä detaljeja rakenteista voidaan mallintaa. Yleensä mallinnusprojektien alussa päätetään pienin sallittu elementtikoko kokonaisen auton korin mallissa. Tässä työssä päätettiin pitää elementtikoon alarajana noin viittä millimetriä (kuorielementin lyhin sivunpituus).

Auton korin peltiosissa on yleensä runsaasti reikiä. Reikiä on erikokoisia, vaihdellen pienistä kiinnitysrei'istä suuriin valmistusasemointireikiin. Edellä mainittu pienin sallittu elementtikoko asettaa tässäkin rajoituksia reikien mallintamiselle. Koska kuten edellä todettiin, pienin sallittu elementin sivun pituus on koko korin analyysien

malleissa noin viisi millimetriä. Tällöin täytyy ainakin tätä kokoa pienemmät reiät jättää kokonaan mallintamatta.

Elementtien sallittu pieni sivunpituus (5 mm) määrittää reikien mallintamisen taktiikan. Pienin tällä tavalla malliin aikaansaattava reikä on sivupituudeltaan viiden millimetrin neliö silloin kuin vain nelisivuiset elementit on sallittuja. Jos kolmisivuisetkin elementit ovat sallittuja, on pienin mahdollinen mallinnettava reikä kolmio, jonka jokainen sivu on viisi millimetriä pitkä. Edellä mainitut elementtien koon rajoitukset tarkoittavat luonnollisesti sitä, että mitä suurempi reikä, sitä tarkempi malli reiän ympäristöstä tulee.

Autojen sisäpuolisissa näkymättömissä peltiosissa on usein uria osan jäykkyyden lisäämiseksi tai jostain muusta syystä (esim. ohjausurat, kiinnitystukiurat). Näiden mallintamiselle pätevät samat rajoitukset kuin reikien mallintamisellekin.

Jos ollaan erityisesti kiinnostettu mitä urille, rei'ille ja muille yksityiskohdille sekä niiden lähiympäristölle tapahtuu analyyseissä, on luotava tarkempi malli em. detalji-alueista. Malli laaditaan pienemmillä elementeillä ja jopa tilavuuselementeillä ja tällaista erillistä tarkkaa mallia analysoidaan tarvittaessa muilla analyyseillä havaituilla voimilla ja muodonmuutoksilla.

3.5 Osien liitosten mallintaminen

Auton korin peltiosat kiinnitetään toisiinsa monin tavoin. Yleisin liitosmenetelmä on pistehitsaus. Paljon pienempää osuutta korin osien liitosmenetelminä edustavat kaari- ja laserhitsausliitos, liimaus sekä ruuviliitokset. Melkeinpä kaikki peltiosat ovat edellä mainittujen liitosten lisäksi kiinni toisissaan myös maalaamossa rakenteiden väliin tunkeutuvilla kemikaaleilla. Eniten osien välissä on pohjamaalia, joka kulkeutuu osien väliin maalaamon upotusaltaissa. Nämä kemikaalit tekevät osien välille liimaliitoksen.

Osien liitosten mallintaminen olisi voinut olla tämän luvun ensimmäisenä kappaleenakin, koska yleensä kannattaa koko auton korin mallintaminen aloittaa osien liitosten mallintamisesta tai ainakin suunnitella heti aluksi niiden mallintamisen tek-

niikkaa. Peltiosien väliset liitokset ovat mallintamismielessä tarkkoja yksityiskohtia ja niiden sijainti, muoto ja käyttäytyminen on usein tarkoin etukäteen määritelty. Käytännön työssä on usein järkevää mallintaa ensin osien kiinnitysalueet ja sitten vasta ympäröivät alueet.

Peltiosiin liittyvien liitosten mallintamisessa kantavana problematiikkana on se fakta, että pellit on mallinnettu pintaelementeillä. Pintaelementeillä ei elementtiverkossa ole paksuutta. Nämä kuorielementtiverkot sijaitsevat pellin paksuuden keskikohdassa ja tällöin kahden rinnakkain liitetyn pellin verkot sijaitsevat pellin paksuuden etäisyydellä toisistaan (kun liitettävät pellit ovat samanpaksuisia). Todellisuudessa rinnakkain liitetyt pellit ovat esim. hitsausliitoksen alueen ympäriltäkin kiinni toisissaan eli peltien liitoslaippojen välillä vallitsee laajalla alueella vakaa kontaktitilanne. Tämän ilmiön mallintaminen toimimaan luonnollisella tavalla voi olla hyvin haastavaa.

3.5.1 Pistehitsausliitosten mallintaminen

Pistehitsaus näyttelee vielä pääosaa autoteollisuudessa peltiosien liittämistavoissa, koska pistehitsaus on hyvin taloudellinen liittämismuoto suurtuotannossa. Liitos, joka levyjen välille syntyy, keskittyy suhteellisen pienelle alueelle ja pistehitsin halkaisijaksi autonsuunnittelussa voidaan pitää noin 3,5 millimetriä.

Elementtimenetelmässä pistehitsimalleja on kahta eri lajia. Ensimmäisessä, pistehitsissä itsessään vaikuttava jännitys halutaan tietää. Tässä tapauksessa tarvitaan hyvin yksityiskohtainen elementtimalli. Toisessa tyypissä pistehitsimallinnuksen tarvitsee ainoastaan simuloida pistehitsin jäykkyysominaisuuksien ja massan vaikutusta ympäröivän rakenteeseen. Tällöin voidaan käyttää paljon yksinkertaisempia elementtimalleja. (Palmonella et al. 2003, 1.)

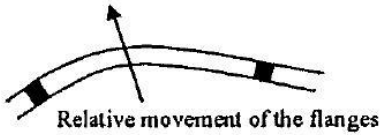
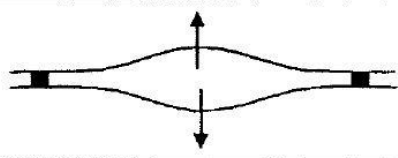
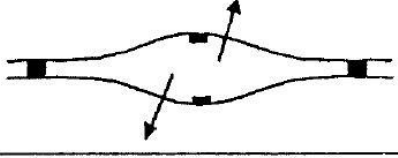

Peltiosien liitosten pistehitsien mallinnukset vaikuttavat merkittävästi mallin kolari-käyttäytymiseen. Ne vaikuttavat suuresti rakenteellisten komponenttien nurjahdus- ja lommahdustaipumuksiin. Taulukko 3.5.1.2 näyttää kahden vierekkäisen yhteen pistehitsatun pellin laippojen peruskäyttäytymistavat kolaritilanteissa.

Ensimmäisessä tapauksessa laipat deformoituvat samaan suuntaan. Toisessa tapauksessa laipat leviävät eri suuntiin pistehitsien välissä. Pistehitsit kuitenkin kestävät.

Kolmannessa tapauksessa pistehitsin kestävä maksimivoima on ylitetty ja laipat erkanevat toisistaan.

Neljännessä tapauksessa mainittua laippojen deformoitumista tapahtuu paljon kolarin alkuvaiheessa rakennealueilla, jotka ovat suurinta energian absorboinnin aluetta. Myöhemmin deformaatioiden kasvaessa neljännen tyyppin deformaatio muuttuu muiksi edellä mainituiksi deformaatiotyypeiksi. Lisäksi neljännen tyyppin käyttäytymistä voidaan havaita alueilla, joissa plastiset deformaatiot ovat vähäisiä, eli alueilla, jotka ovat kolaritilanteessa suhteellisen kaukana korin plastisaatiokeskuksista. Koska voimat ovat pienempiä näillä alueilla, käyttäytymistavat 1-3 eivät esiinny ollenkaan tai ovat erittäin vähäisiä näillä korin alueilla. (Volz 1998, 3.).

Taulukko 3.5.1.2. Kiinnityslaippojen käyttäytymistä kolaritilanteessa (Volz 1998, 3). Behaviour patterns = käyttäytymistavat, flange = laippa.

	Behaviour patterns	Descriptions
Case 1		Flange deformation in the same direction
Case 2		Flanges spread apart
Case 3		Spot weld failure => welds are torn apart or shear off
Case 4		Relative shift of flanges

Vaihtoehtoja pistehitsausliitoksen mallintamiseksi on useita. Useimmat näistä menetelmistä on kerrottu taulukossa 3.5.1.1.

Ensimmäinen tapa (WM1) on mallintaa osat suoraan toistensa jatkoksi ilman päällekkäin tai limittäin meneviä osia. Tässä vaihtoehdossa laippa-alue on kokonaan poistettu.

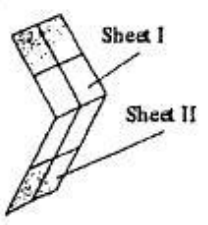
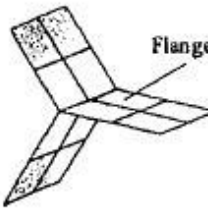
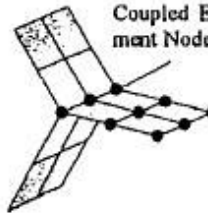
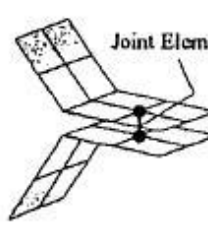
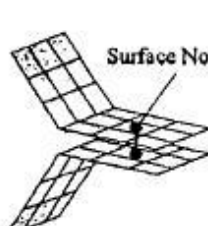
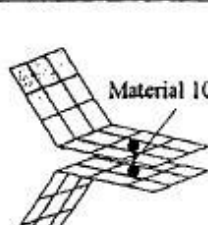
Toinen tapa (WM2) on muuten sama kuin edellinen mutta tässä laippa-alue on olemassa. Edelleen Koko tutkittava rakenne on ikään kuin yhtä ja samaa kappaletta. Tässä on etuna edelliseen, että laippa-alueen massa tulee otetuksi huomioon.

Seuraava tapa (WM3) on edellisen tavan lähisukulainen ja siinä päällekkäin tai limittäin menevät osat on liitetty yhdistämällä osien solmupisteitä yhteen. On huomioitava, että tässä ilman todellista paksuutta olevat elementtiverkot ovat täysin samassa tasossa ja niiden solmupisteet ovat yhteisiä ja määritetty kiinni toisiinsa. Tämä tapa on ollut perinteisesti auton korien staattisissa analyyseissä yleisesti käytetty. Tämä tapa on käyttökelpoinen, kun tehdään analyysejä, jossa ei tarvitse ottaa huomioon mahdollisia eri osien deformaation aiheuttamia kontaktitilanteita. Kontaktitilanteissakin tämä liittämistapa on jossain määrin käyttökelpoinen silloin, kun kontaktialgoritmissa ei oteta huomioon levynpaksuuksia. Jos taas kontaktialgoritmi ottaa huomion kuorielementeille määritellyn paksuuden, ovat tällä tavoin yhteenliitetyt kappaleet valmiiksi tunkeutuneet toisiinsa jo analyysin lähtötilanteessa.

Neljäs tapa (WM4) mallintaa liitokset on liittää kappaleet mallintamalla kappaleiden solmujen välille 1D-elementtejä (sauva-, palkki-, jousi-, pistehitsielementtejä jne.). Tämä on hyvin yleinen tapa mallintaa pistehitsit. Tässä kummankin liitettävän osien elementtiverkot sijaitsevat niiden alkuperäisillä materiaalinpaksuuden keskilinjoilla. Tässä tapauksessa voidaan käyttää laippa-alueilla materiaalin paksuuden huomioonottavia kontaktialgoritmeja.

Viides tapa (WM5) on vain joillekin ratkaisijaohjelmille soveltuva. Tässä liitetään kappaleet 1D-elementeillä, jotka on mallinnettu kuorielementin keskeltä kuorielementin keskelle. Tämä tapa luonnollisesti edellyttää sitä, että pistehitsin kohdalle on määritelty sellainen nelisivuinen elementti, jossa on solmu sen keskellä.

Taulukko 3.5.1.1. Pistehitsien mallintamistapoja (Volz 1998, 8). Sheet = pelti, flange = laippa, joint elements = yhdistävät elementit, nodes = solmut.

Version	Symbol	Comments
<i>WM1</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Flanges are not taken into account
<i>WM2</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Flanges are taken into account by one element layer - Computation of a replacement flange thickness
<i>WM3</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Flanges are taken into account by two identical element layers - Common nodes in flange area are coupled - Use of real sheet thickness in the FE model
<i>WM4</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Flanges are taken into account by two element layers - Element layers are located at a distance to each other - Distance of element layers is identical to distance of neutral fibres - Joint elements: Spot Weld, Welded Node Sets, Discrete Beam or combinations
<i>WM5</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Surface Nodes are placed over the contact on the element surface => Sliding Interface Card, Type Number 8 – Nodes Spot welded to Surface - Joint elements are attached between surface nodes - Joint elements: Spot Weld, Welded Node Sets, Discrete Beam or combinations
<i>WM6</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Surface nodes are placed over the contact on the element surface => Sliding Interface Card, Type Number 7 – Shell Edge Tied to Shell Surface - The spot weld is modeled by a beam (Beam Element Type 9, Material Type 100) - From LS-DYNA Version 940

Du Bois (1999, 1.19) on vertaillut solmusta solmuun ja elementin keskeltä elementin keskelle mallinnettujen pistehitsimallinnusten ominaisuuksia (kts. taulukko 3.5.1.1).

Taulukko 3.5.1.1. Solmusta solmuun ja elementistä elementtiin –tyyppisten liitostapojen vertailua (Paul Du Bois 1999, 1.19)

Solmusta solmuun	Elementistä elementtiin
Pistehitsillä ei ole todellisia dimensioita	Pistehitsillä on määrätty koko
Sallii laipan leviämisen (spreading)	Sallii laipan leviämisen (spreading)
Sallii voimien ja momenttien välittymisen laippojen kesken	Sallii voimien ja momenttien välittymisen laippojen kesken
Kiertöjäykkyys on pääasiassa ääretön	Materiaalimallin määrittelemä kiertojäykkyys
Ei salli laippojen solmujen vapaata sijoittelua Laippojen solmupisteiden pitää osua vastakkain	Laippojen solmupisteiden vapaa sijoittelu Laipat voidaan mallintaa itsenäisesti
Tietyillä optioilla ei vaikuta laskenta-aika-askeleen kokoon	Palkkielementit yleensä vaikuttavat laskenta-aika-askeleen kokoon
<u>Kaksi</u> elementtiä laipan leveydellä sallii pistehitsien sijoittamisen laipan keskelle	<u>Kolme</u> elementtiä laipan leveydellä tarvitaan (pistehitsi mallinnettu keskilinjan elementteihin)

Elementin koon vaikutus?	Laipan keskirivin kuorielementtien tulisi olla todellisen pistehitsin halkaisijan kokoisia (~5 mm)
--------------------------	--

Tässä kappaleessa edellä mainitut lisäelementillä tehdyt pistehitsien mallinnustavat ovat perustuneet 1D-elementteihin. Pistehitsi voidaan myös mallintaa tilavuuselementin (brick element) ja kuorielementin avulla (Palmonella et al. 2003, 2).

Kuten havaittiin, pistehitsien mallinnustapoja on kovin monia. Käytännöllisintä on mallintaa auton korin peltiosien laippa-alueet siten, että siinä voidaan kokeilla mahdollisimman helposti erilaisia pistehitsien malleja. Auton korin osien väliset pistehittävät laippa-alueet ovat yleensä noin 15 mm leveitä ja pistehitsit sijaitsevat laipan leveyden keskikohdalla. Yllämainituista pistehitsien mallinnustavoista suurimmalle osalle olisi edullista se, että laippa-alueen kuorielementtiverkko tehtäisiin kolmen nelikulmioelementin levyiseksi ($3 \times 5 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$). Tällöin keskimmäisen rivin elementteihin voidaan kiinnittää peltiosien väliset pistehitsausta simuloivat elementit kohtuullisen helposti ja ne sijaitsevat valmiiksi oikeilla paikoilla laipan keskikohdassa.

3.5.2 Kaarihitsausliitosten mallintaminen

Tutkitun auton korissa oli käytetty vähäisessä määrin kaarihitsausliitoksia. Kaarihitsausliitosten mallintamisessa on monta vaihtoehtoa.

Ensimmäinen tapa on mallintaa kaarihitsit ilman lisäelementtejä. Tässä tavassa levyjen päittäisliitoksissa tai T-liitoksissa yhteenliittyvät osat mallinnetaan suoraan toisiinsa kiinni siten, että liitoksen alueella kaikki osat käyttävät yhteisiä elementtien solmuja. Tässä mallintamistavassa ongelmana on se, että liitoksesta tulee massaton ja tarvittaessa tämä puuttuva massa on sisällytettävä esim. yhteenliittyvien verkkojen reunimmaisiiin elementteihin. Usein kuitenkin kaarihitsien massa on niin pieni, että se voidaan jättää laskelmissa huomiotta.

Toinen tapa mallintaa kaarihitsit on yhdistää yhteenliittyvät osat toisiinsa kaksisolmuksilla sauva-, jousi-, palkki- tai pistehitsielementeillä. Tällöin liitokselle on mahdollista määrittää myös massa ja lujuusominaisuuksia. Ongelmana näitä kaksisolmuksia elementtejä käytettäessä on se, että yhteenliittyvien osien verkotus pitää olla varsin tiheä liitoksen alueelta. Vastakkaisten osien verkkojen solmujen tulisi sijaita siten, että kaksisolmuksiset liitoselementit voisivat olla pinnan normaalin suuntaisia.

Kolmas tapa on käyttää kaarihitsien mallintamisessa neliö- tai kolmiokuorielementtejä. Tällöin analyysissä saadaan jo varsin kattavia tietoja kaarihitsiin syntyvistä jännityksistä. Chee & Bakar (2007, 29) mukaan nelisolmuinen neliökuorielementti antoi parhaimmat tulokset pintaelementeistä. Tässäkin mallinnustavassa on sama ongelma kuin sauvaelementtimallinnuksessa eli yhteenliitettävien osien verkotus tulee olla liitosalueelta varsin tiheä. Levyjen päittäisliitoksissa on vielä se ongelma, että elementin sivu voi tulla niin lyhyeksi, että eksplisiittisessä analyysissä laskennan aika-askleet lyhenevät sen vuoksi.

Viimeinen tapa tehdä kaarihitsi on mallintaa se tilavuuselementeillä. Tätä tapaa ei kuitenkaan yleensä auton koko korin mallintamisessa käytetä. Tilavuuselementtejä käytetään erillisissä detaljitutkimuksissa, jos se on tarpeen.

3.5.3 Laserhitsausliitosten mallintaminen

Nykyaikaisessa auton korien valmistuksessa laserhitsauksen osuus on nousussa. Prosentuaalisesti laserhitsausliitosten osuus koko auton korissa on kuitenkin vielä varsin pieni. Tutkimuksen kohteena olevassa auton korissa näitä liitoksia ei ollut yhtään.

Laserhitsausliitoksia käytetään nykyään pääosin kahdella eri tavalla. Toinen on kahden päällekkäisen pellin liittäminen toisiinsa key hole –hitsauksella. Toinen, yhä suurempaa suosiota jatkuvasti saava kohde ovat räätälöidyt pellit (tailored blanks). Näissä räätälöidyissä koripelleissä on laserhitsauksella yhdistetty samaan peltiosaan eripaksuisia peltejä päittäisliitoksella. Nämä eripaksuisia kohtia sisältävät pellit on syvävedetty haluttuun muotoonsa ja näin yhteen ja samaan osaan saadaan haluttuja lujuusominaisuuksia tarvittaville alueilla.

Rinnakkain kiinnitettyjen peltien key hole –hitsaukset mallinnetaan samalla periaatteella, kuin kaarihitsitkin. Räätelöity pelti (eripaksuisia alueita sisältävä osa) yleensä mallinnetaan siten, että kyseisen osan elementtiverkossa määritellään pintaelementeille oikeat paksuudet. Lisäelementtejä ei siis tässä yhteydessä käytetä, koska laserhitsausliitosten irtirepeytymistä ei yleensä tarvitse tutkia.

3.5.4 Ruuviliitosten mallintaminen

Ruuviliitoksia auton korissa ja sen elementtimallissa ei useinkaan ole. Auton koria käsiteltäessä käytetään usein termiä Body-In-White (BIW). Autoteollisuudessa yleensä tällä termillä tarkoitetaan auton koria, josta ei enää mitään osia saada irti ruuveja tms. aukaisemalla ja irrottamalla. Kyseessä on siis kori, joka voidaan ajatella olevan yksi tuote, jonka kaikki osat ovat jollain hitsaustavalla liitettynä toisiinsa. Joissain yhteyksissä kuitenkin BIW määritellään sisältävän myös etulokasuojat, jotka hyvin usein ovat ruuviliitoksella ja liimalla kiinni korissa. Kolaritesteissä sitten usein mukana ovat etulokasuojat, ovet, luukut, puskuripalkit, istuimet, ohjauspyörä jne. Näiden yhteydessä ruuviliitokset tulevat yleensä aina kysymykseen.

Tässä tutkimuksessa mallinnettu kori ei sisältänyt ruuviliitoksia. Periaatteessa ruuviliitokset mallinnetaan samalla tekniikalla, kuin kaarihitsausliitoksetkin. Elementtiverkko tulisi pyrkiä mallintamaan ruuvinreikien ympäriltä siten, että liitoselementit saadaan asetettua siten, että ruuvin leveän kannan vaikutus kiinnitykseen tulisi huomioonotetuksi.

3.5.5 Liimaliitosten mallintaminen

Auton korin peltiosien väliset liimaliitokset toimivat periaatteessa samalla kuin kaarihitsauksetkin. Liitosalueen leveys vain on yleensä paljon hitsauskaariliitosta isompi ja mahdollisia liitoselementtejä mahdollisesti joudutaan rakentamaan laajemmalle alueelle. Joissakin eksplisiittisissä ratkaisijoissa (mm. LS-Dyna) liimaliitoksen pettämistä voidaan simuloida tätä käyttötarkoitusta varten kehitetyn kontaktialgoritmin avulla.

Liimaliitosten mallintaminen on yleensä haastavaa ja aikaavievää. Periaatteessa auton korin pistehitsattujen laippaliitosten välillä on maalin aikaansaama liimaliitos. Maalin tai muiden korin uppokäsittelyssä laippojen väliin kulkeutuneiden kemikaalien aiheuttaman liimaliitoksen pitokykyä ei yleensä tarkkaan tunneta ja se voi myös vaihdella laipan eri alueilla ja eri koriyksilöissä. On kuitenkin aivan selvää, että väliin tunkeutunut aine entisestään parantaa peltiosien välistä kontaktia ja tekee laipan jäykemmäksi.

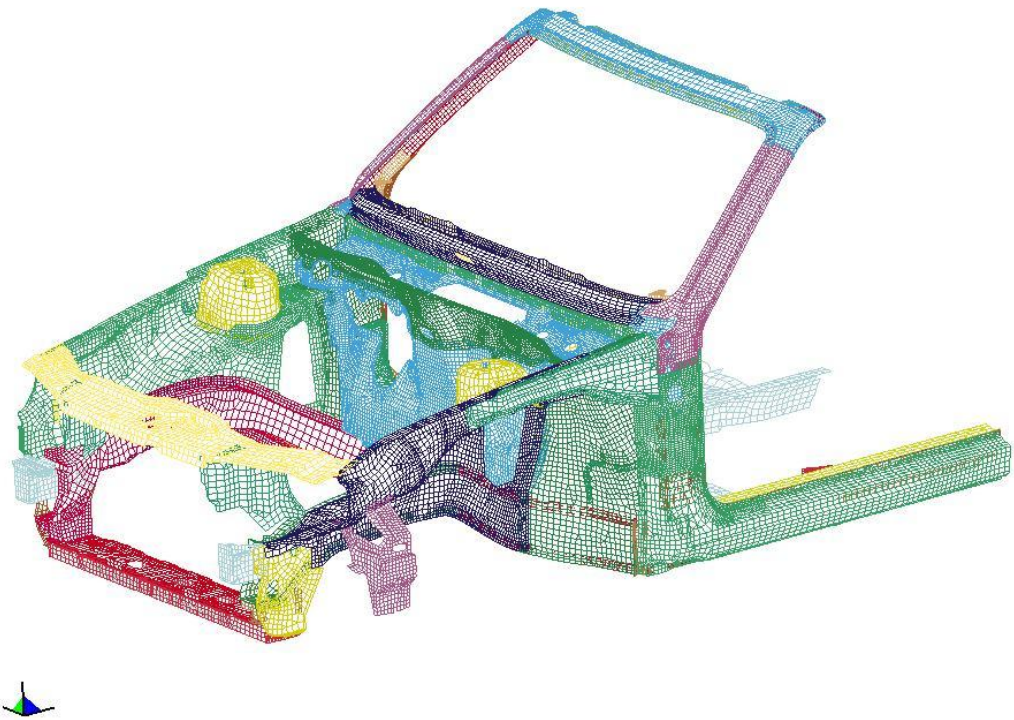
Maalin ja muiden kemikaalien aiheuttamien liimausvaikutuksien tuntemattomuuden vuoksi liimaliitoksen osuutta ei usein mallinneta koko korin malleissa mitenkään. Kun tutkitaan liimaliitoksin liitettyjä kappaleita, olisi ensiarvoisen tärkeää saada mahdollisuus testata oikeaa rakennetta samalla tavalla kuin virtuaalitestissäkin. Eri-tyisesti kolarisimulaatioita varten saataisiin ennakkotietoa mistä esim. liimaliitos on pettänyt ja näillä alueilla elementtimalliin voitaisiin yrittää mallintaa liimausta realistisemmin.

3.6 Yhteenveto aikaansaadusta mallista

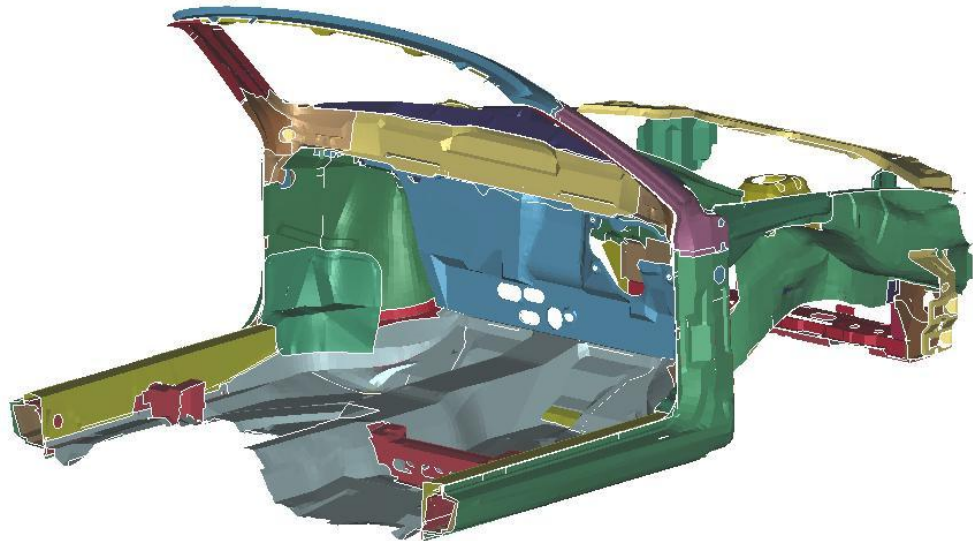
Tätä tukimusta varten laaditun mallin työvaiheeseen kuuluivat: pintamallien rakentaminen rautalankamalleja, oikean autojen mittauksia ja valokuvia käyttäen sekä elementtiverkkojen laatiminen pintamallien avulla. Osien välisten pistehitsausalueitten laipat mallinnettiin kolmen elementin levyiseksi. Osa laipoista on liitetty ilman lisäelementtejä, yhdistämällä vierekkäisten osien solmuja. Osa pistehitseistä sekä kaikki kaarihitsit on mallinnettu sauvaelementeillä.

Laskentaa kevennettiin jättämällä mallista pois koko auton peräpää. Malli on katkaisu suunnilleen lattian keskikohdalta, ovien takareunan kohdalta. Peräpäällä ei uskottu olevan vaikutusta laskennan tuloksiin. Oikean auton korin testissä lattiaan leikattiin testausinstrumentointia varten suuri suorakaiteen muotoinen reikä. Myös elementtimalliin tehtiin vastaavanlainen reikä (kts. kuva 3.7.1).

Erillisiä mallinnettuja (pelti)osia mallissa on 46 kpl, kuorielementtejä on yhteensä 101906 kpl, sauvaelementtejä on 138 kpl.



Kuva 3.7.1. Laskentamallin elementtiverkot.



Kuva 3.7.2. Laskentamallin elementtiverkot varjostettuna.

4 VIRTUAALINEN YMPÄRIAJO TESTI

Tämän tutkimuksen yhtenä päätarkoituksena oli tehdä FMVSS 216:n kuvailema ympäriajoturvallisuustesti modifioidulla Saab 93:n korilla sekä sitä muistuttavalla elementtimallilla. Korilla on muutettu alkuperäisestä siten, että A-pilarien sisään on asennettu suurlujuusteräksiset vahvikeputket. Nämä vahvikeputket ulottuvat A-pilarin yläosasta kynnykseen asti kulkien vähän matkaa vielä kynnyksien sisässä taaksepäin.

Edellä on mainittu, että elementtimenetelmällä tällaisen ympäriajoturvallisuustestin (roof crush test) voisi tehdä sekä implisiittisen että eksplisiittisen menetelmän avulla. Tässä tutkimuksessa päätettiin keskittyä pelkästään eksplisiittisen menetelmän käyttämiseen, koska sen käyttämisestä haluttiin kartuttaa kokemusta. Tästä saadaan testitulokset vertailukäyttöön sitten kun testi mahdollisesti joskus tehdään myös implisiittisellä menetelmällä (tämän tutkimuksen ulkopuolella).

Laskennassa saatujen tulosten oikeellisuus tarkistetaan tekemällä oikealle autolle (auton korille) sama testi.

4.1 Ympäriajoturvallisuutta koskeva standardi FMVSS 216

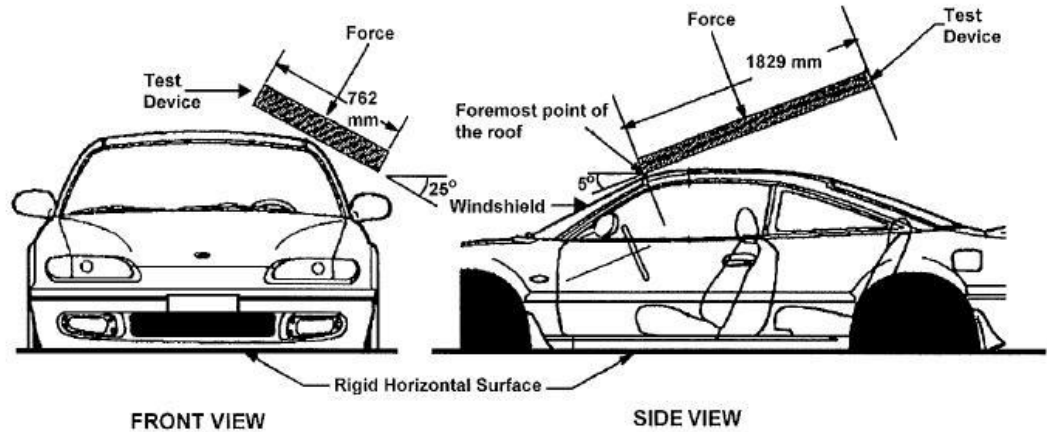
Miksi siten tässä tutkimuksessa tehtiin juuri tämä nimenomainen standardin FMVSS 216 mukainen testi? Kyseinen FMVSS 216 –standardissa määritelty ympäriajoturvallisuustesti valittiin tähän tutkimustapaukseen sen monipuolisuuden takia.

Korirakenteiden virtuaalikoestuksessa eri testit jakautuvat varsin selkeästi kahdella erilaisella ratkaisijatyypillä tehtäviin testeihin. Näistä ensimmäinen on implisiittisellä ratkaisijalla tehtävät korin osien ja osakokonaisuuksien staattisiin lujuusominaisuustestit ja dynaamisiin ominaistajuus- ja –muotoanalyysiin. Toinen on eksplisiittisellä ratkaisijalla tehtäviin suurten muodonmuutosten analyysit. Lähes kaikki eri testaustavat jakautuvat selkeästi jompaankumpaan edelliseen kategoriaan. FMVSS 216:n mukainen testi on kuitenkin yhtä hyvin ja huonosti kumpaankin kategoriaan sopiva testi.

Testin aikana korirakenteeseen tulee absoluuttisesti mitattuna varsin suuri muodonmuutos, joka puoltaisi eksplisiittisen menetelmän käyttöä. Tämä suuri muodonmuutos tapahtuu kuitenkin suhteellisen hitaasti alueiden pienien venymien summautumisesta ja tämä taas olisi soveliasta implisiittiselle menetelmälle. Testissä painetaan ylhäältä etuviistossa auton A-pilaria (kts. kuva 4.1.1) auton painoon suhteutetulla voimalla ja auto läpäisee testin, jos sen A-pilari ei yläpäästään painu voiman vaikutussuunnassa 125 millimetriä enempää. Testi on hyvin elementtimenetelmälle haastava, koska siinä auton koriin tulee kohtuullisia muodonmuutoksia ja korit voivat deformatua kyseisessä testissä sekä elastisesti että plastisesti. Osien tai liitosten murtumisiakin voi esiintyä.

Toinen tärkeä motiivi FMVSS 216:n käyttämisestä tässä tutkimuksessa on, että tutkimuksen sivutuotteena saadaan tutkimustietoa oikean avoauton käyttäytymisestä kyseisessä testissä. Tähän asti avoautojen ei ole tarvinnut läpäistä standardin mukaista testiä mutta avoautojen valmistajat ovat määrätietoisesti yrittäneet kehittää autojen

rakennetta sellaiseksi, että ne läpäisisivät sen. Se voisi olla merkittävä myyntivaltti valmistajalle, jos sen valmistamat autot läpäisisivät testin.



Kuva 4.1.1 Standardin kuvaus painimen asennosta ja voiman vaikutussuunnasta (FMVSS 216, 18).

4.2 Laskentaparametrit virtuaalisessa ympäriajotestissä

Ennen kuin virtuaalitesti voidaan elementtimallin avulla tehdä, täytyy analyysille määritellä laskentaparametreja, kiinnitykset sekä määritellä mallissa käytetyille osille materiaalien käyttäytymismallit ja käytettävät kontaktialgoritmit.

4.2.1 Laskennassa käytettävät yksiköt

Jo heti laskentamallin rakentamisen alkumetreillä sekä laskentaparametreja määriteltäessä on valittava käytettävä yksikköjärjestelmä. Yksikköjärjestelmän valinta on hyvin tärkeää, jotta laskelmat voisivat tuottaa odotetunlaisia tuloksia ja joskus vaikeastikin selvittävät skaalausvirheet voitaisiin välttää.

Yleensä autojen pintamallit on laadittu millimetrejä käyttäen. Mahdolliset todellisten rakenteiden mittauspisteet mitataan ja siirretään CAD:iin myös samassa mittakaavassa. Millimetrimitoitettujen pintamallien avulla tehdyistä elementtimalleista tulee myös millimetrimitoitettuja.

Tämän tutkimuksen FEM-analyysi laadittiin käyttäen kuvan 4.4.1 taulukossa viidenneksi ylimpänä olevaa yksikköjärjestelmää (kg, mm, ms, kN, GPa jne.).

MASS	LENGTH	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY	DENSITY	YOUNG's	35MPH 56.33KMPH	GRAVITY
kg	m	s	N	Pa	J	7.83e+03	2.07e+11	15.65	9.806
kg	cm	s	1.0e-02 N			7.83e-03	2.07e+09	1.56e+03	9.806e+02
kg	cm	ms	1.0e+04 N			7.83e-03	2.07e+03	1.56	9.806e-04
kg	cm	us	1.0e+10 N			7.83e-03	2.07e-03	1.56e-03	9.806e-10
kg	mm	ms	KN	GPa	KN-mm	7.83e-06	2.07e+02	15.65	9.806e-03
g	cm	s	dyne	dy/cm ²	erg	7.83e+00	2.07e+12	1.56e+03	9.806e+02
g	cm	us	1.0e+07 N	Mbar	1.0e+07 Ncm	7.83e+00	2.07e+00	1.56e-03	9.806e-10
g	mm	s	1.0e-06 N	Pa		7.83e-03	2.07e+11	1.56e+04	9.806e+03
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	7.83e-03	2.07e+05	15.65	9.806e-03
tonne	mm	s	N	MPa	N-mm	7.83e-09	2.07e+05	1.56e+04	9.806e+03
lbf-s ² /in	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33e-04	3.00e+07	6.16e+02	386
slug	ft	s	lbf	psf	lbf-ft	1.52e+01	4.32e+09	51.33	32.17
kgf-s ² /mm	mm	s	kgf	kgf/mm ²	kgf-mm	7.98e-10	2.11e+04	1.56e+04	9.806e+03
kg	mm	s	mN	1.0e+03 Pa		7.83e-06	2.07e+08		9.806e+03
g	cm	ms		1.0e+05 Pa		7.83e+00	2.07e+06		9.806e-04

Kuva 4.4.1. Vaihtoehtoisia yksikköjärjestelmiä vaakariveittäin (LS-DYNA Support, Consistent units).

Osien törmätessä toisiinsa ratkaisijaohjelmaan sisällytetyt kontaktialgoritmit tarkkailevat osien välisiä kontaktitilanteita. Kontaktialgoritmeja on hyvin paljon monenlaisia ja kannattaa katsoa ratkaisijaohjelmien käyttöoppaista mitä vaihtoehtoja on tarjolla ja millaiset käyttöohjeet, rajoitukset ja tulosten tulkitsemiseen liittyvät ominaisuudet niillä ovat.

4.2.2 Teräksen materiaalmallit

Tässä työssä ratkaisijaohjelmana käytettiin LS-Dyna:a, jossa on mukana lähes kaksisataa erilaista materiaalmallia. Peltiosien materiaalmalliksi tähän tutkimukseen valittiin materiaalin käyttäytymisen kuvaus ”*MAT_PLASTIC_KINEMATIC”. Tässä materiaalmallissa tarvitaan käyttäjältä seuraavat tiedot: materiaalin tiheys, kimmoduli, Possonin suppeumakerroin, materiaalin myötöraja, muokkauslujittumiseksponentti (tangent modulus) ja muokkauslujittumisparametri.

Yleensä kirjallisuudesta löytyvät jännitysvenymäkäyrät (engineering stress-strain curve) ovat annettu materiaalin vetokokeen kappaleen alkuperäisiin mittoihin perustuen. Vetokokeessa kuitenkin vetosauvan poikkileikkausala pienenee koko ajan ja mitattu voiman arvo pitää suhteuttaa kappaleen senhetkiseen poikkipinta-alaan. Tällä tavoin saadaan todelliset jännitysvenymäkäyrät (true stress/true strain curve), joita usein tarvitaan FE-analyysien materiaalien mallinnuksessa.

Eri peltiosien materiaaliarvot saatiin Saabin materiaalitietokannasta. Muokkauslujittumiseksponentti on todellisen jännitysvenymäkäyrän plastisen osuuden kuvaajan kulmakerroin. Muokkauslujittumiseksponentin arvoksi valittiin 0,10 – 0,15.

4.2.3 1D-elementit

Pistehitsien ja kaarihitsien kuvauksessa käytettiin LS-Dyna:n ”*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY” –korttia. Kaikki mallissa olleet 1D-elementit määriteltiin toimimaan tämän mallin mukaisesti. Tämä malli toimii siten, että sauvaelementin solmuissa kiertymät eivät ole sallittuja. Sauvojen pituus on muuttumaton eli ne eivät veny jännityksessä.

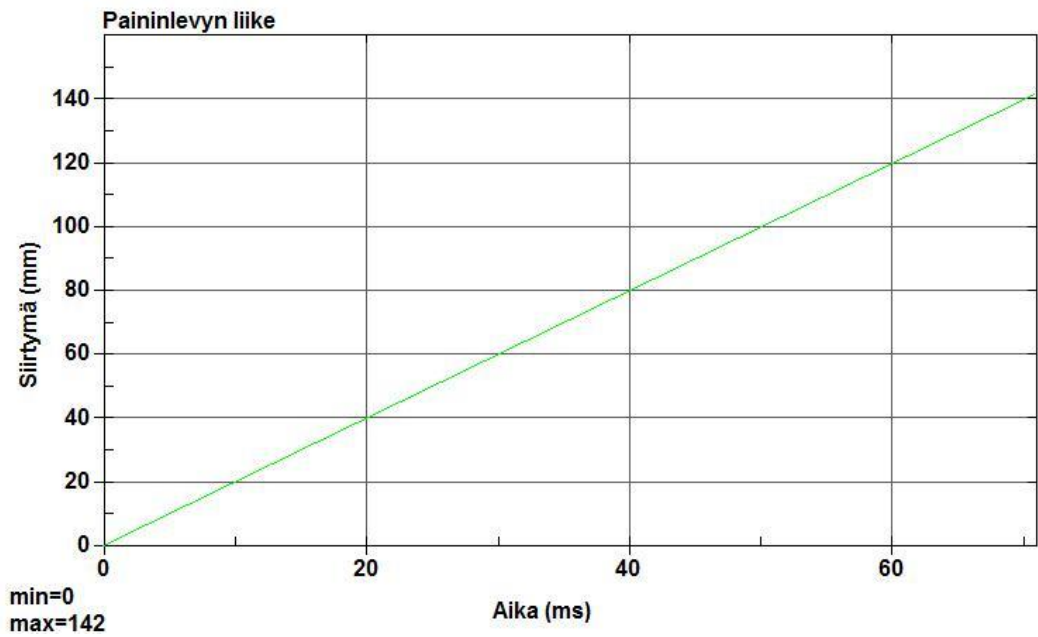
4.2.4 Levynpaksuuksien määrittely

Mallissa eri peltiosat (niitten elementtiverkot) on kaikki nimetty erikseen. Kaikille näille nimetyille osille on määritelty oma paksuutensa malliin. Levyjen paksuudet on saatu auton suunnittelutiedoista.

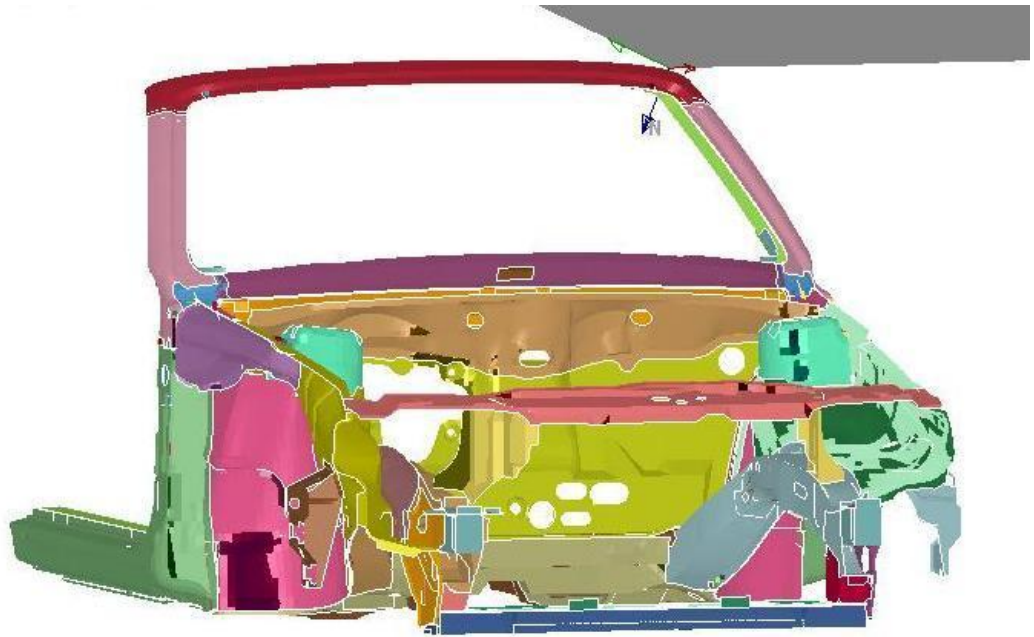
4.2.5 Käytettävät tuennat ja kuormitustavat

FMVSS 216 –standardissa määritellään, että kori tulee olla tuettu pohjastaan paikoilleen. Tässä mallissa se toteutettiin siten, että helmojen elementtiverkkojen alimmille solmuille määriteltiin reunaehdoiksi liikkumattomuus. Näiden solmujen ei sallittu liikkuvan mihinkään xyz-koordinaatiston akselin suuntaan.

Auton A-pilaria yläreunasta painavalle levyllä on FMVSS 216 –standardissa määritetty kallistuskulmat, kulkusuunta ja siirtymä. Paininlevy mallinnettiin LS-Dyna:n ”*RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION” –kortin avulla. Levy on täysin joustamaton. Levy on määritelty äärettömän kokoiseksi (vaikka se kuvassa 3.7.4 näkyykin äärellisenä). Tälle kortille levyn liikkumisehdot haetaan erillisestä käyrästä, jonka kuvaaja on kuvassa 3.7.3. Paininlevyn liikenoiteeksi valittiin Schweizerhof et al. (1999, 16) tutkimuksessa tämäntyyppiseen virtuaalitestiin sopivaksi havaittu 2000 mm/s. Tuolloin 71 millisekunnissa levy kulkee 142 millimetrin matkan. FMVSS 216 –standardissa siirtymäksi on määritelty 125 mm mutta koska oikeaa auton koriakin testattiin 142 mm asti, päätettiin tehdä sama myös virtuaalitestissä.



Kuva 3.7.3. Paininlevyn siirtymä ajan funktiona



Kuva 3.7.4. Paininlevy (harmaalla kuvattuna).

4.2.6 Käytettävä kontaktialgoritmi

Laskennassa käytettiin kontaktialgoritmina LS-Dyna:n ”*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE_SMOOTH” -korttia. Kortista valittiin kontaktialgoritmi koskemaan kaikkia mallissa olevia osia. Muina parametreina käytettiin kortin oletusarvoja.

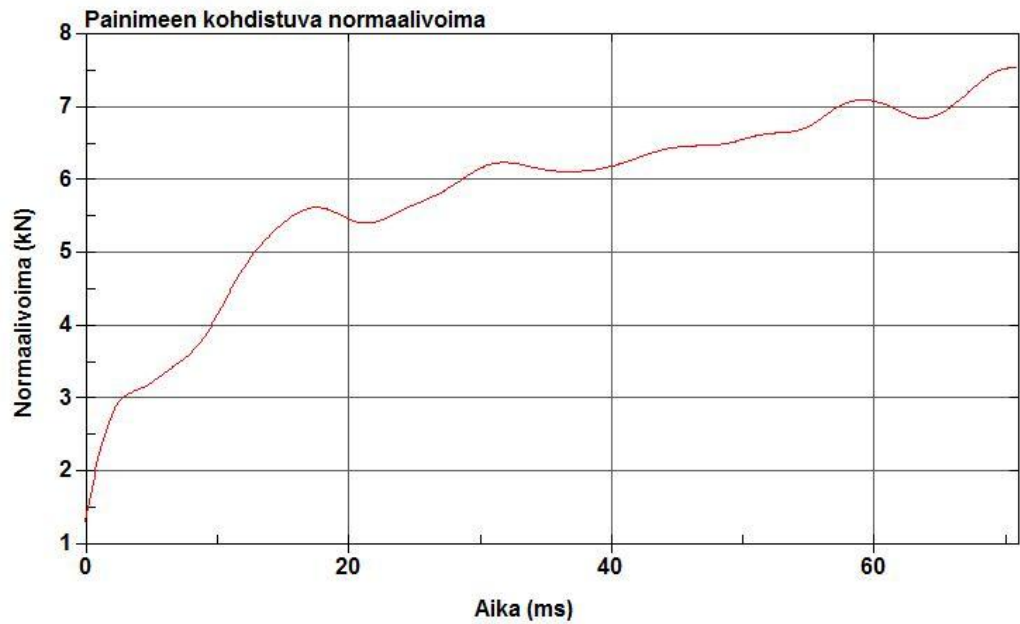
4.3 Laskenta

Laskenta tehtiin 64-bittisellä Hewlett-Packard Compaq 6910p –kannettavalla tietokoneella, jossa oli kellotaajuudeltaan 2.00 GHz:n Intel Core2 T7300Duo -tuplaydinprosessori sekä 32-bittinen Microsoft Windows Vista Pro SP2 -käyttöjärjestelmä. Tietokoneen keskusmuisti (RAM) oli 2 GB. Laskennassa käytettävä ohjelma oli LS-DYNA versio ls971s R4.2 rev 50638.

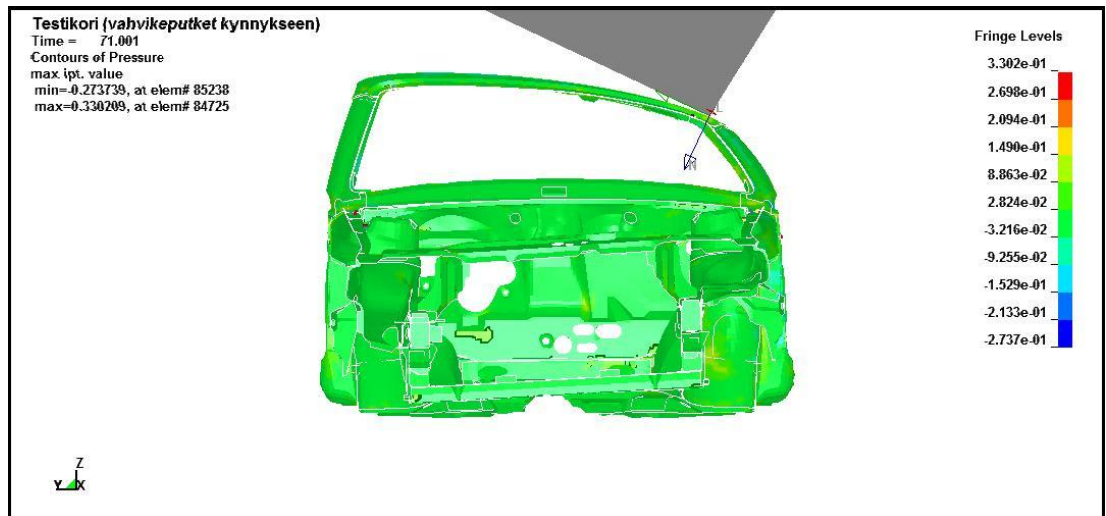
Analyyysin laskenta-aika oli 3 h 5min 50 sec.

4.4 Virtuaalisen ympäriajotestin tulokset

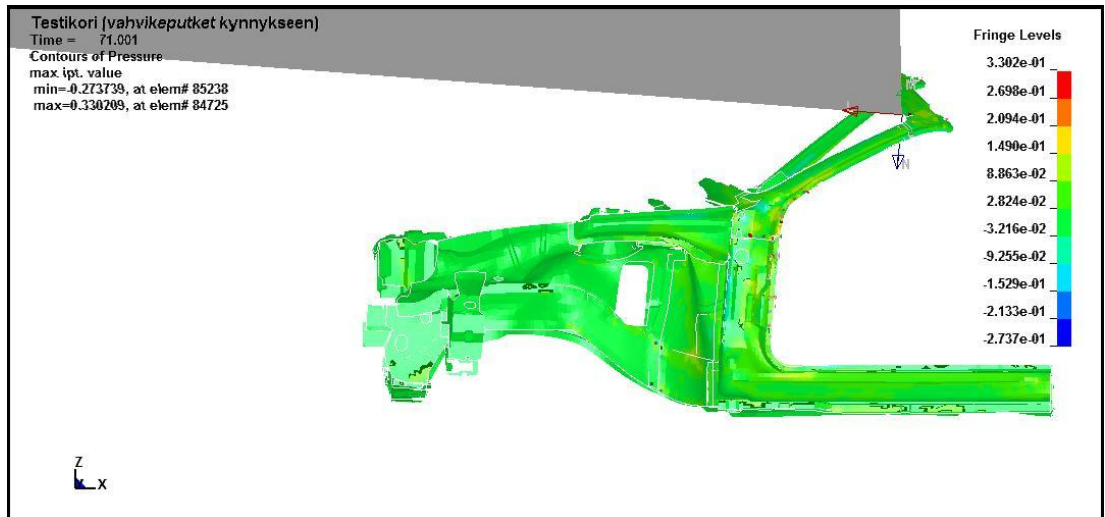
Virtuaalitestissä oltiin kiinnostuneita siitä, millainen voima kohdistuu paininlevyyden liikeradan aikana. Levy liikkui lineaarisesti 71 millisekunnin aikana 142 millimetriä. Tulokset on esitetty kuvassa 4.8.1. Maksimivoima on 71 ms kohdalla (142 mm siirtymä) 7,55 kN.



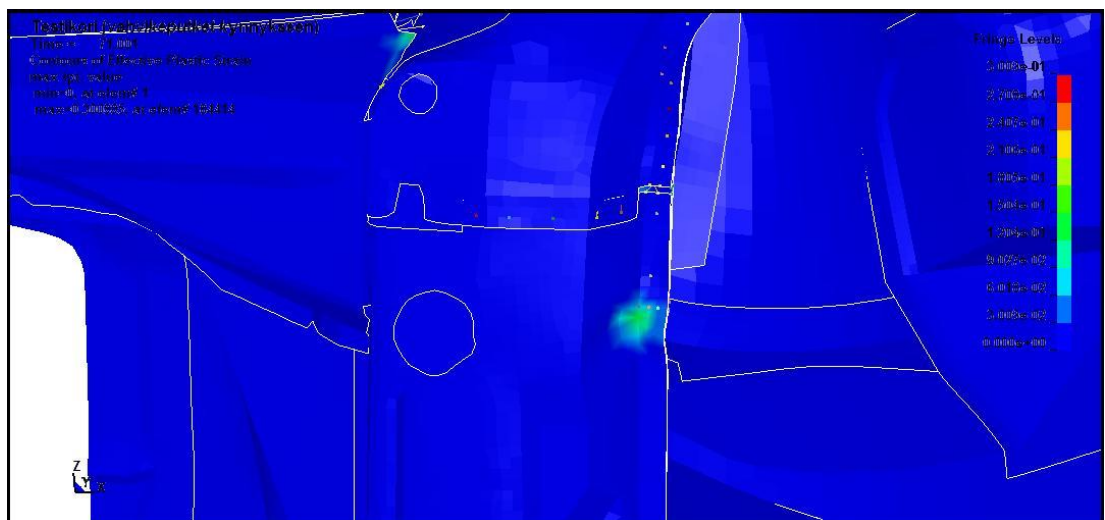
Kuva 4.8.1. Autoa painavaan jäykkään levyyn kohdistuva vastinvoima (suodatettu SAE-60 Hz –suodattimella).



Kuva 4.8.2. Analyysin lopputilanne edestä.



Kuva 4.8.3. Analyysin lopputilanne vasemmalta.



Kuva 4.8.4. A-pilarin vertikaaliosan takareunan lommahdus (vertaa kuvaan 5.3.6)

5 YMPÄRIAJOTESTI OIKEALLE AUTON KORILLE

Elementtimenetelmän avulla laskettujen testitulosten todenmukaisuuden tutkimiseksi haluttiin tehdä oikealle auton korille samanlainen testi kuin virtuaalimallillekin tehtiin. Mahdollisuuksien mukaan, tulisi FEM-analyysien avulla saadut tulokset aina tarkistaa vastaavilla todellisilla fysikaalisilla testeillä.

Tässä tutkittavassa tapauksessa FE-mallin toimivuuden tarkistaminen ehdottomasti haluttiin myös tehdä, joten valmistelut testattavan korin valmistamiseksi ja testausjärjestelyiden tekemiseen aloitettiin. Toiveena oli saada koestettavaksi sellainen kori, joka ei ole vielä mennyt valmistuslinjan suojaus- ja maalausprosessien lävitse. FE-mallissa ei nimittäin oltu mallinnettu mitenkään näitä em. prosesseissa osien välille syntyviä fysikokemiallisia liitoksia.

5.1 Testikorin valmistaminen

FEM-analyysillä tutkittu korirakenne ei ollut täysin sarjatuotannonomainen, joten ensin piti rakentaa mahdollisimman paljon FEM-analyyseissä käytettyä mallia vastaava auton kori. Jouduttiin pohtimaan sitä, voitaisiinko tutkimuskori valmistaa kokonaisuudessaan normaalin tuotannon yhteydessä tehtaassa valmistuslinjalla vai täytyisikö se koota prototyypipajalla. Prototyypipajalla kokoamisessa olisi lisäksi vielä kaksi erilaista vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kori koottaisiin alusta asti monenlaisista yksittäisistä osista sekä tehtaassa moduuliasemilla kootuista osakokonaisuuksista. Toisessa vaihtoehdossa tuotaisiin tehtaassa tuotantolinjan hitsaamosta valmiiksi kokoonpantu (hitsattu) sarjatuotantokori ja se muokattaisiin prototyypipajalla testin tarpeita vastaavaksi.

Ensimmäiseksi lähdettiin siis tutkimaan, voitaisiinko tutkimuskori rakentaa valmiiksi asti tehtaassa tuotantolinjan hitsaamossa. Korinhitsauslinjalla korien valmistusjärjestystä ja -tapaa tarkemmin tutkimalla todettiin, että tuotantokoriin liittymättömät rakennevahvikkeet (A-pilarin putkivahvikkeet, joita FEM-analyysissä tutkittiin), olivat luonteeltaan sellaisia, että niitä ei voitaisi liittää alkuperäiseen rakenteeseen tuotantolinjalla normaalin valmistusvirran yhteydessä. Vaikka tuotantolinjalle olisi tuotu tutkimuskorille ominaiset valmiiksi muunnellut osakokonpanot, ei auton kulkeminen

tuotantolinjaa pitkin olisi ollut mahdollista, sillä uudet vahvikeputket olisivat sijainneillaan estäneet korin asemoimisen päähitsauskokoontelinedessä. Koska testikoria ei siis mitenkään voitu tehdä tuotantolinjalla, päätettiin kori rakentaa tuotekehitysosaston prototyypipajassa.

Testikori päätettiin siis rakentaa prototyypipajalla, koska koria ei voitu teettää tehtaassa tuotantolinjan hitsaamossa normaalin tuotannon yhteydessä. Tutkittiin sitten, voisiko korin ottaa linjalta erilaisina suurempina moduuleina ja näin rakentaa prototyypipajalla tutkimuskori vähän nopeammin näistä suurempikokoisista osakokoonpanoista. Tarkemman tutkimisen jälkeen osoittautui myös tämä kappaleen alussa kuvattu idea käyttökelpottomaksi. Kokoonpanolinjan eri osakokoonpanopisteistä olisi kyllä saatu sopivat osakokonaisuudet, joihin lisävahvikeputket olisi ollut helppo asentaa ja sitten hitsata korin osat toisiinsa lopulliseksi kokonpanoksi. Prototyypipajalla ei olisi kuitenkaan saatu hitsatuksi koria tarpeeksi mittatarkasti yhteen ilman mittavia kokoonpanotelinerakennelmia. Ylipäätään minkäänlainen osakokonaisuuksien liittäminen toisiinsa ei olisi onnistunut ilman suuritöistä väliaikaisten tukirakenteiden rakentamista.

Kolmantena vaihtoehtona tutkittiin mahdollisuutta seurata normaalissa tuotannossa hitsauslinjalla valmistuvaa koria vaihe vaiheelta ja ottaa se sopivassa vaiheessa pois kokoonpanolinjalta ennen lopullista valmistumista. Tämän jälkeen se voitaisiin rakentaa lopulliseen muotoonsa asti prototyypipajalla. Toiveena tässä vaihtoehdossa oli se, että kori valmistuisi hitsaamossa sellaisessa järjestyksessä, että se voitaisiin ottaa sivuun linjalta lähellä sen loppupäätä. Tällöin kori olisi pääosin jo lopullisessa muodossaan ja vain muutamia sellaisia osia puuttuisi, joiden poissaolo mahdollistaisi helposti vahvikeputkien asentamisen. Loput puuttuvat korin osat olisi sitten kiinnitetty paikoilleen prototyypipajalla. Tällä tavalla toimien testikori olisi saatu tehtyä loppuun prototyypipajalla varsin pienellä lisätyöllä, koska juuri mitään kokoonpanotelinerakennelmia ei olisi tarvinnut tehdä. Tämäkin vaihtoehto todettiin lopulta huonoksi. Tuotantolinjan rakenteesta ja osien asennusjärjestyksestä johtuen koria ei voinut eikä kannattanut ottaa korinhitsauslinjalta sivuun ennen linjan pääteasemaa. Tuotantolinjalla auton osakokonaisuuksia rakennetaan ympäri koripajaa eri pisteissä ja vasta pääkokoonpanotelinedellä nämä varsin suurikokoiset osakokonaisuudet liite-

tään yhtä aikaa toisiinsa. Tämä olisi johtanut lopulta samaan tilanteeseen kuin edellisessä vaihtoehdossakin tutkittiin.

Lopulta kaikkien edellisten vaihtoehtojen jälkeen päätettiin aloittaa testikorin rakentaminen hankkimalla tuotantolinjalta kokonaan valmis sarjatuotantokori ja tarvittavat muutokset tehtäisiin siihen sitten tuotekehitysosaston prototyypipajalla. Tämä vaihtoehto tarkoitti väistämättä sitä, että valmista koria pitäisi purkaa ja sen osia leikellä. Irtileikattavat osat tulisivat olemaan kuitenkin sen verran pieniä, että koria ei tarvitsisi tukea prototyypipajalla minkäänlaisin tukirakennelmin.

Nyt alettiin siis kartoittaa testattavan korin saatavuutta kokonaisuena valmiiksi hitsattuna ja mieluummin ruostesuojamattomana ja maalaamattomana. Jotta toiveiden mukainen suojaamaton ja maalaamaton kori olisi saatu, olisi tällainen kori pitänyt erikseen tilata korihitsaamosta. Korin saamiseen olisi voinut kulu viikkoja sillä tuotantojärjestys linjalla on suunniteltu viikkoja - jopa kuukausia etukäteen. Testikorin koestamiseen testaushallissa oli käytettävissä vain tietty ajanjakso ja korin saaminen vasta viikkojen päästä ei sopinut testausryhmältä tilattujen töiden aikatauluun. Korin rakentaminen suunniteltua testiä varten on myös varsin merkittävä rahallinen sijoitus yritykselle ja toiveena oli, että testiä varten löytyisi jostain valmis kori, joka on jostain syystä hylätty tuotannosta sinne kelpaamattomana.

Sopiva kori testin tekemistä varten löytyi loppujen lopuksi maalaamosta. Sieltä löytyi valmiiksi hitsattu kori, joka oli, ikävä kyllä, käynyt valmistuslinjan suojaus- ja maalausprosessit lävitse. Tällainen kori oli jäänyt maalaamoon ylimääräiseksi, koska siihen oli testattu uuden pintamaalin väri vaihtoehtoa, jonka oli määrä tulla tuotantoon vasta jonkin ajan kuluttua. Tämä väriltään keltainen kori oli kaikin puolin ehjä ja virheetön ja näin ollen vastasi tuotantoauton koria. Tämä kori siirrettiin maalaamosta prototyypipajaan muutostöiden tekemistä varten.

5.1.1 Korin osien irrotus

Testikori rakennettiin valmista tuotantolinjalta saatua koria muuttamalla. Valmiin korin peltiosia piti irrottaa, jotta vahvikeputket saatiin kiinnitettyä rakenteisiin oikeille paikoilleen. Pääosin Saab 9-3 Cabrioletin korin osat on liitetty yhteen pistehit-

sausmenetelmällä. Myös joitakin MIG/MAG-menetelmällä hitsattuja kaarihitsejä on paikoittain. Tarvittavat pistehitsit porattiin auki tähän tarkoitukseen suunnitellun poranterän avulla. Tällä avaamisen menetelmällä päällimmäiseen (teränpuoleiseen) peltiosaan tulee halkaisijaltaan noin kuuden millimetrin kokoinen pyöreä reikä. Alempan peltiin tulee vastaavaan kohtaan halkaisijaltaan noin kahden millimetrin pyöreä reikä. Myös muutama kaarihitsausliitos jouduttiin avaamaan. Kaarihitsausliitosten avaaminen tehtiin pienikokoisella pneumaattisella kulmahiomakoneella.

Hitsausliitosten avaamisen jälkeen peltiosat olivat vielä varsin tiukasti liimautuneet kiinni toisiinsa korille tehtyjen suojaus- ja maalaus käsittelyiden kemikaaleilla. Nämä liitokset oli vielä saatava auki ennen kuin osat lopullisesti irtosivat toisistaan. Korin peltiosat liimautuvat toisiinsa pääosin pohjakäsittelylaitoksella rakenteiden väliin tunkeutuvalla pohjamaalilla. Pohjakäsittelylaitoksella korit upotetaan kokonaan nestealtauksiin ja näin lähes kaikkiin korin laippaliitosten väleihin tulee pohjamaalia. Pohjamaalauksen jälkeen tulevat väli- ja pintamaalit ruiskutetaan koriin (tai paremminkin ilmassa lejuva maaliumu "imetään" erimerkkisten sähkövarausten avulla koriin) ja näin ollen nämä maalit eivät yleensä juurikaan kulkeudu rakenteiden sisään.

Kemiallisilla sidoksilla toisiinsa liimautuneet peltiosat irrotettiin toisistaan mekaanisesti. Irrotus tapahtui käsin, työntämällä taltta laippaliitosten väliin ja pakottamalla ne erilleen. Tässä irrottamistyössä käytettiin mahdollisimman ohutta talttaa ja osia pakotettiin irti toisistaan varovasti edeten, jotta osat eivät vääntyilisi. Irrotettavista osista mahdollisimman moni haluttiin säästää ja kiinnittää myöhemmin takaisin paikoilleen. Mahdollisesti vääntyneet laippaliitokset oiottiin käsityökaluilla.



Kuva 5.1.1.1. Tarvittavat peltiosat irrotettuna vahvikeputken asentamista varten.



Kuva 5.1.1.2. Lähikuva puretusta A-pilarin vertikaaliosasta ja kynnyspalkista.

5.1.2 A-pilareiden vahvikeputkien tekeminen

Tutkittavan auton korin A-pilareiden tuiksi rakennettiin vahvikkeet teräsputkesta. Nämä vahvikeputket muotoiltiin prototyypipajalla. Vahvikeputket leikattiin ja muotoiltiin suorasta Mannesmann MW 1000 L -putkesta. Kyseisentyyppinen putki on valmistettu hyvin lujasta teräsoksesta. Kokemuksesta tiedettiin, että kyseisentyyppisen putken muotoilu ei onnistu kylmänä prototyypipajassa saatavilla olevilla putkentaivutuslaiteilla. Putken taivuttaminen ja muotoilu auton rakenteisiin sopivaksi piti tehdä siis putkea ensin kuumentamalla.

Auton eri sivuille tehtiin erilaiset vahvikeputket. Aluksi ajatuksissa oli tehdä auton molemmille sivuille samanlaiset A-pilarin peltirakenteiden sisään asennettavat vahvikeputket. Rakentamistyö aloitettiin auton vasemmalta sivulta. Tarvittava työmäärä ja -aika osoittautuivat hyvin suuriksi, kun putki haluttiin asentaa peltirakenteiden

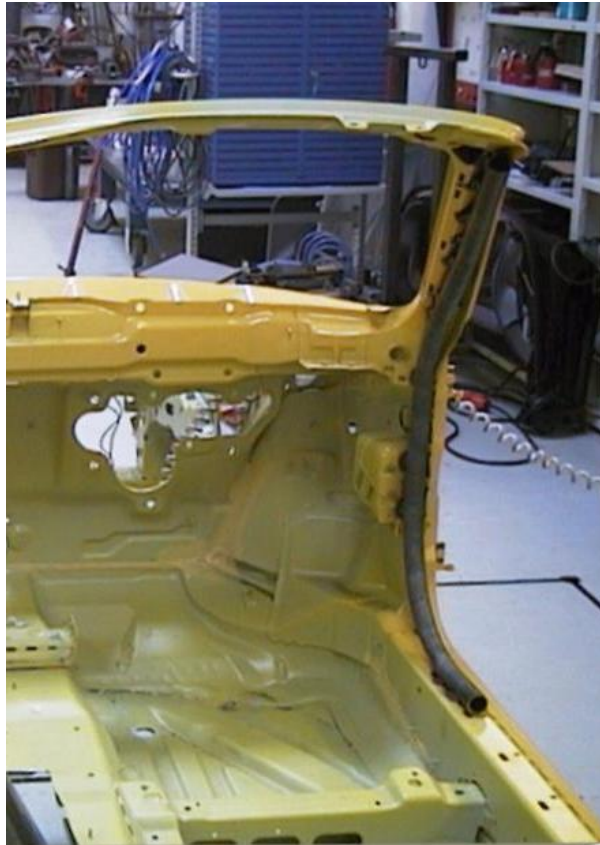
sisään. Yrityksen yhtenä haluna tämän diplomityön yhteydessä oli saada tietää, mikä kokoinen putki peltirakenteiden sisään mahtuisi ja miten suuri työ sen asentaminen olisi. Tämä asia selvisi vasenta sivua tehdessä ja ajan ja kalliiden työtuntien säästämiseksi auton oikean sivun vahvikeputkea ei enää haluttu asentaa A-pilarin peltirakenteiden sisään.



Kuva 5.1.2.1. Auton vasemman sivun A-pilarin vahvikeputki lopullisessa muodossaan.

Auton oikean sivun A-pilarin tueksi putki asennettiin rakenteiden päälle. Tällä tavalla toimien säästyttiin aikaa vievältä peltirakenteiden purkamiselta ja uudelleenkoamiselta. Koska suunnitellussa testauksessa voima kohdistuu pääosin auton vasemman sivun rakenteisiin, kuviteltiin tämän oikean sivun käyttäytyvän kyseisen-

tyyppisessä testauksessa lähes kuten putki olisi asennettu myös oikean puolen sivun rakenteiden sisään.



Kuva 5.1.2.2. Auton oikean sivun A-pilarin tukiputki paikalleen hitsattuna.

Vahvikeputkien lujuusominaisuuksien haluttiin säilyvän kuumana tehtävän muokkauksen jälkeenkin. Putkia kuumennettiin tarkasti putken valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti, jotta varmistuttaisiin siitä, että putken lujuus säilyisi ennallaan. Putken toimittajan antaman selosteen mukaan putken lujuusominaisuudet pitäisi olla kuumamuokkauksen jälkeen toimitustilan mukaiset oikeanlaisen jäädyttämisen jälkeen. Ohjeiden mukaan kuumamuokkausta ei saisi tehdä alle 920 asteen lämpötilassa. Kuumentamisessa pidettiin teräksen lämpötilavärikartan avulla silmämääräisesti tarkkaillen huoli siitä, että kuumentumista tapahtuisi niin paljon, että putken lämpötila ennen muokkausta olisi ohjeissa määritetty 920 astetta tai sen ylitse. Tässä lämpö-

tilassa putkien muotoilu miesvoimin käsityökaluilla onnistui helposti. Putkea kuumentettiin kaasuliekillä noin kahdenkymmenen senttimetrin pituinen osa kerrallaan ja tämä oranssihehkuinen alue muotoiltiin auton rakenteiden mukaiseksi.

Vahvikeputkien lujuusominaisuuksia ei tutkittu ennen muokkaamista eikä myöskään sen jälkeen. Tutkimuksessa käytetty putkimateriaali on vetolujuudeltaan hyvin lujaa ja kuumentamisen avulla tehdyssä muokkauksessa on vaarana, että ilman muokkauksen jälkeen tehtävää lämpökäsittelyä materiaalin lujuusarvot jäävät huomattavastikin toimitustilan arvoja alhaisemmiksi. Putkien muotoilu kuumentamalla yritettiin tehdä kaikin mahdollisin keinoin tarkasti valmistajan ohjeita noudattaen, jotta putkien lujuus säilyisi halutunlaisena (toimitustilaa vastaavana). Putken toimittajan antamaan informaatioon toimitustilan ominaisuuksista ja lujuusominaisuuksien säilymisestä muokkauksessa luotettiin ja näin ollen minkäänlaisia lujuuskokeita materiaalille ei tehty missään vaiheessa.

Tutkimuksessa käytetyn A-pilarien lisävahvikeputkien mekaaniset ominaisuudet sekä muokkaus- ja hitsaussuositukset ovat toimittajan antaman selostuksen mukaan seuraavanlaiset:

Mannesmann MW 1000 L -putken, toimitustila:

- vetolujuus 1400 N/mm²
- myötöraja väh. 1000 N/mm²
- murtovenymä väh. 8 %

Muokkausohjeet (vapaasti käännettynä Mannesmannin ohjeesta):

- **Kylmämuokkaus:** *Kylmämuokkaus on toimitusoloissa vain osin mahdollista. Ennen kylmämuokkausta aine on hehkutettava pehmeäksi ja muokkauksen jälkeen ilmakarkaistava uudelleen. Ilmakarkaisu tarkoittaa sitä, että putki saavuttaa mekaaniset ominaisuutensa jäähtymällä ilmassa normalisointilämpötilassa.*
- **Kuumamuokkaus:** *Kuumamuokkaus on suoritettava yli 920 asteen lämpötilassa. Uusi ilmakarkaisu ei yleensä ole tarpeen.*
- **Hitsaus:** *Terästä voidaan hitsata kaikilla menetelmillä käsin ja automaattisesti. Etusijalla on hitsausmenetelmät, joissa käytetään suojakaasua, vähän*

vetyä ja alkaalisia elektrodeja. Lämpötila on sovitettava putken dimensioihin ja lämpötilan tulisi olla mahdollisimman alhainen. Karkaistuissa putkissa esiintyy lämmön vaikutusalueen hyvin kapealla alalla pientä lujuusheikkene mistä, mikä ei yleensä vaikuta rakenteeseen. Tämän alueen laajuus riippuu lämmöntonnon määrstä ja putken seinämän paksuudesta.

5.1.3 Osien kiinnittäminen ja kokoonpano

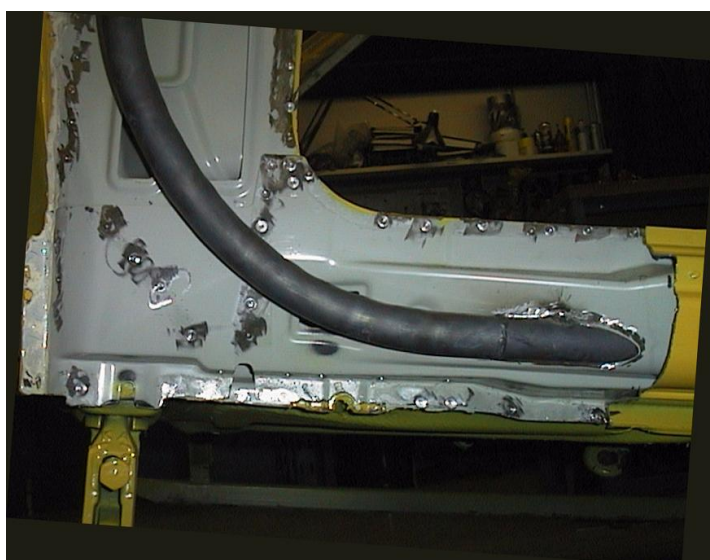
A-pilarin vahvikeputkien valmistumisen jälkeen auton koria alettiin jälleen koota. A-pilarin vahvikeputket sovitettiin paikoilleen ja ne hitsattiin MIG-menetelmää käyttäen kiinni korin rakenteisiin. Oheisista kuvista tämän luvun loppupuolella käy hyvin ilmi hitsien pituudet ja välimatkat. Putkien asentamisen jälkeen korin rakentamista jatkettiin kiinnittämällä takaisin purkamisen yhteydessä poistetut peltiosat.

Kaikki purkamisen yhteydessä irrotetut peltiosat korvattiin alun päinvastaisista kaa viluista huolimatta kokonaan uusilla osilla. Uusien osien käyttämiseen oli kaksi pääsyytä: 1. alkuperäiset osat jouduttiin irrottamaan varsin väkivaltaisesti ja ne vääntyivät paljon, 2. vanhoissa osissa olevat suojaus- ja maalikerrokset olisivat haitanneet hitsiliitosten tekemistä. Vääntyneiden osien oikomiseen olisi tarvittu paljon työtä ja samalla osien vääntely muokkauslujittaa niitä jossain määrin. Tämä mahdollinen lisämuokkauslujittuminen haluttiin eliminoidavan, jotta tätä ilmiötä ei tarvitsisi yrittää sisällyttää FE-malliin (toisaalta korin osien syvävedossa tapahtuva muokkauslujittuminenkin on pääosin jätetty huomioon ottamatta tehdyissä FEM-analyyseissä...).

Useita korvaavia osia jouduttiin leikkaamaan pienemmiksi tai niistä leikattiin pois joitakin pieniä alueita. Monet irrotetuista osista jouduttiin jo poistettaessa leikkaamaan suuremmasta kokonaisuudesta erikseen irti. Esimerkiksi A-pilarin vertikaaliosaa peittää päällimmäisenä auton koko sivun mittainen pelti. Tätä noin kolme metriä pitkää peltiosaa ei tietenkään poistettu kokonaan, vaan siitä leikattiin vain pieni osa poistettavaksi. Tilalle laitettiin sitten vastaavan kokoinen uudesta isosta kokonaisuudesta ulkosivupeltiosasta irtileikattu kappale. Vahvikeputkille ei oltu alun perin suunniteltu tilaa auton rakenteisiin, joten kahdesta asennettavasta peltiosasta piti leikata pois pienet palat, jotta vahvikeputket saatiin kunnolla mahtumaan aseemiinsa.



Kuva 5.1.3.1. Vahvikeputken liitoshitsit A-pilarin viisto-osan alueella.



Kuva 5.1.3.2. Vahvikeputken liitoshitsit A-pilarin viisto-osan ja pystyosan risteyksessä.

Putkien kiinnittämisen jälkeen kiinnitettiin uudet em. kappaleessa mainitulla tavalla muokatut peltiosat paikoilleen. Osien irrotusvaiheessa aukiporatut pistehitsit hitsattiin entisiin kohtiinsa tulppahitsauksena MIG-menetelmällä päällimmäisen osaan tehdyn reiän kohdalta. Koska tutkimukseen käytettävä kori oli jo käynyt läpi tehtaan maalauslinjan prosessit, olivat korin peltiosat suojatut monilla maalikerroksilla pistehitsipaikkojen ympäriltä. Jos pistehitsit olisi haluttu tehdä alkuperäistä poikkeavalle paikalle, olisi tämä paikka pitänyt puhdistaa huolellisesti. Pistehitsejä oli rakenteessa niin paljon, että käytännössä kaikki liitettävät peltiosat olisi kokonaisuudessaan pitänyt puhdistaa peltipuhtaaksi kaikkien laippaliitosten alueelta.

5.2 Korin koestamisen valmistelu

Testikorin valmistuttua aloitettiin koestamisen valmistelu. Testattava kori tuotiin prototyypipajalta testaushalliin ympäriajotestin tekemistä varten. Testaushallissa kori kiinnitettiin varta vasten tätä yksittäistä testiä varten rakennettuun telineeseen. Kun kori oli saatu kiinnitettyä, asennettiin paikoilleen paininlaitteisto ja mittausanturit.

Luvussa neljä on tarkka kuvaus testistandardista mutta selkeyden vuoksi kerrataan tässä vielä standardin määrittely testikorien kiinnittämiseksi. Federal Motor Vehicle Safety Standard (USA) FMVSS 216 Roof Crash Resistance-Passenger Cars -standardin mukaan korin pitäisi "maata" testitasolla siten kun korin pohjan muodot sen sallivat. Standardin kohta S7.1 sanoo (vapaasti käännettynä): *"Aseta ajoneuvon kynnykset tai runko jäykälle vaakasuoralle pinnalle, kiinnitä ajoneuvo liikkumattomaksi paikalleen, sulje kaikki ikkunat, sulje ja lukitse kaikki ovet, ja aseta avoauton katto tai irrotettava kattorakenne paikalleen matkustamotilan päälle. Poista kattotelineet tai muut ei-rakenteelliset komponentit"* (FMVSS 216, 1995).

5.2.1 Korin kiinnittäminen

Standardin määrittelemä kiinnitystapa on varsin väljä ja monin osin kiistanalainen. Standardin selostuksesta ymmärtää, että kori pitäisi kiinnittää (ilmeisesti?) kynnysko-

teloiden alapuolisen laippaliitoksen koko mitalta liikkumattomaksi auton molemmilta sivuilta. Standardista ei käy kuitenkaan lainkaan ilmi se miten kiinnittäminen tälle "jäykälle vaakasuoralle pinnalle" tulisi tehdä. Koko matkaltaan laippaliitosten kiinnittäminen alustaan vaatisi monien kiinnitysleukaparien käyttöä. Testiauton kynnyskotelot ovat alapinnaltaan varsin monimuotoiset ja varsinkin korkeussuunnassa vaihtelua on monia kymmeniä millimetrejä. Mittauslaboratoriossa ei ollut mahdollista kiinnittää koria kokonaan laippaliitosten pituudelta. Koko matkaltaan kiinnittämisen sijaan kynnykset kiinnitettiin pisteittäin mittaustasoon kiinni.

Standardin määritelmä: "*liikkumattomaksi paikalleen*" antaa periaatteessa mahdollisuuden kiinnittää auton alustaan mistä pisteestä tahansa. Varsinkin rintapeltialueen etupuolelle tehtävät kiinnitykset vaikuttavat jossain määrin testituloksiin, sillä taipuva A-pilari vipuvaikutuksellaan (varsinkin avoautossa) nostaa myös keulan rakenteita ylöspäin. Jos tämä keulan nouseminen estetään kokonaan tai osittain keulan alueelle sijoittuvilla kiinnityksillä, se luonnollisesti vaikuttaa testin tuloksiin.

Testikori kiinnitettiin lattiaan testausta varten vain tätä yhtä testitilannetta varten rakennettuun symmetriseen testausasetelmaan. Ensimmäiseksi testauspaikalle rakennettiin teräksisten tolppien ja putkien avulla teline, joka pitää korin n. 350 millimetrin korkeuteen lattiasta. Kori nostettiin näin ylös, jotta kiinnittämisessä voitiin käyttää testaushallin varustukseen kuuluneita vanttiruuveja. Kiinnitysasetelman molemmilla sivuilla on kaksi teräksistä tolppaa. Kullakin sivulla näiden tolppien päälle on asetettu suorakaideprofiiliteräsputki. Nämä putket muodostavat sillan tolppien välille. Kori on asetettu näiden pitkittäisten teräsputkien päälle siten, että korin kynnyskoteloiden ja lattian väliset liitoslaipat ovat koko matkaltaan putkien päällä.

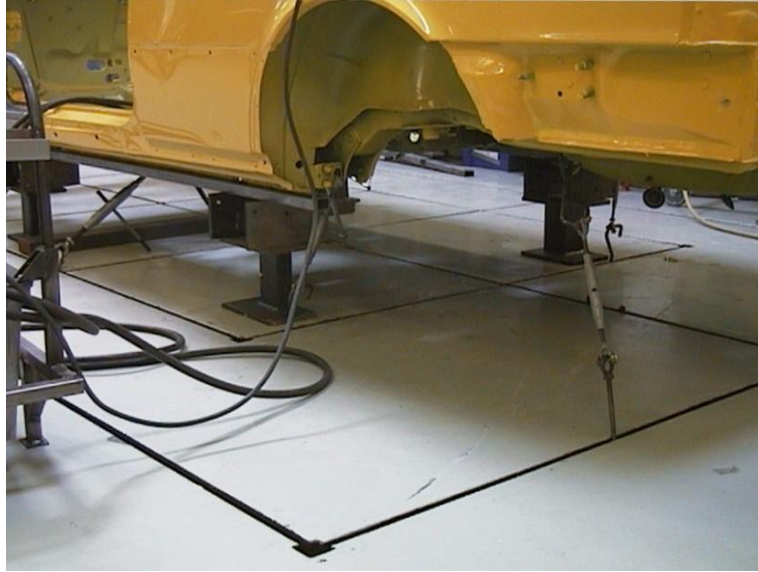
Kun kori oli laskettu teräsputkien päälle, kiinnitettiin kori liikkumattomaksi vanttiruuvien ja koukkujen avulla. Korin kummallakin sivulla on kolme kiinnityspistettä. Korin aukkoihin laitettiin koukut ja testaushallin lattiaan asennettiin vastaaville sijoille kiinnityslenkit. Kiinnityskoukut ja kiinnityslenkit yhdistettiin ketjuksi vanttiruuvien avulla. Vanttiruuveja kiristettiin vuoronperään vähän kerrallaan, jotta kori ei kallistuisi maatessaan teräsputkien päällä. Vanttiruuvit kiristettiin sellaiseen tiukkuuteen, että silmämääräisesti korin peltiosat eivät alkaneet myötämään.



Kuva 5.2.1.1. Etupään kiinnitykset.



Kuva 5.2.1.2. A-pilarin alaosan kiinnitys.



Kuva 5.2.1.3. Takapään kiinnitykset.

5.2.2 Paininlaitteiston ja mittausantureiden asentaminen

Korin kiinnittämisen jälkeen asennettiin paininlaitteisto ja mittausjärjestelmät. Paininlaitteistosta puhuttaessa tässä yhteydessä pitäisi oikeastaan puhua vetolaitteistosta sillä standardista poiketen testi tehtiin painamisen sijaan vetoliikkeellä.



Kuva 5.2.2.1. Paininlaitteisto ja mittausanturit.

Tutkittavan korin pohjalevyyn jouduttiin sahaamaan reikä, jotta vetolaitteisto saatiin kunnolla ankkuroitua lattiaan ja vetosuunta oikeaan kulmaan. Testistandardin määritelmässä testi tehdään erillisellä korin ulkopuolisella laitteistolla, joka painaa A-pilarin yläkulmaa alaspäin. Testausosastolla ei kuitenkaan ole tällaista laitteistoa, joten testaus haluttiin tehdä tässä kappaleessa kuvatulla huomattavasti halvemmallalla ja yksinkertaisemmalla menetelmällä. Tässä menetelmässä A-pilarin painaminen suoritetaan A-pilarin yläkulmaan asennettavan painimen ja testaushallin lattian väliin sijoitettavalla hydraulisella vetosylinterillä. Koriin leikattu reikä on otettu huomioon FEM-analyyseissä tekemällä samanlainen reikä FE-malliin.

Testausasetelman rakentamisen helpottamiseksi koriin porattiin painimen ja korin kosketuskohtaan pieni reikä. Painin kiinnitettiin ruuvilla tähän reikään. Näin tämä varsin painava painin saatiin kiinnitettyä heti alkuunsa oikeaan asemaan ja kulmaan. Näin mittausantureiden ja vetosylinterin kiinnitykset voitiin tehdä helpommin ilman vaaraa, että painin luistaisi oikeasta asemastaan pois.

Tätä painimen kiinnitystä ruuvien avulla korin rakenteisiin ei otettu huomioon FEM-analyysissä. Standardissa määritellään painimen liikesuunnaksi yksi ja sama suunta-vektori. Tätä ajatusta noudatettiin myös itse FEM-analyysissä. Virtuaalitestissä myös mallinnettiin painimen ja korin välinen kontakti kitkattomaksi.

Tällä tavalla kiinnitettynä painin voi myös aiheuttaa kosketusalueellaan korin peltiin paikallista taivutusta, jos kuormitusosuutta muuttuu levyyn nähden A-pilarin taipuessa. Tämä mahdollinen pellin paikallinen taipuminen ja siihen kuuluva muodonmuutosenergia on jätetty huomioimatta FEM-analyysissä.

FEM-analyysissä ei myöskään ole otettu huomioon sitä, että painimen ollessa kiinteästi korissa kiinni (ruuvattuna siihen), vetosuunta voi poiketa alkutilanteen jälkeen hieman standardin vaatimuksesta. Kun A-pilari taipuu voiman vaikutuksesta, paininlevyn liikeradan suunta alkaa mahdollisesti poikkeamaan alkuperäisestä liikesuunnasta. Ilmiöstä aiheutuvat voimavaikutukset auton koriin oletettiin poikkeavan standardin mukaisesta koestusohjeesta sen verran vähän 125 mm:n siirtymällä, että tätä mahdollista liikeratapoikkeamaa ei yritetty mallintaa virtuaaliteistiin.

Vetovaijerin (teräsköysi) ja vetosylinterin muodostama ketju asetettiin siten, että välystä oli mahdollisimman vähän. Välys asetettiin (sovitettiin) vanttiruuvien avulla siten, että heti kun voima-anturi antoi nollassa poikkeavan arvon, säädettiin ruuvia juuri sen verran takaisinpäin, että voimamittari näytti nollassa.



Kuva 5.2.2.2. Mittausanturointi.

5.3 Korin testaus ja tulokset

Testilaboratoriossa testi suoritettiin varsin yksinkertaisin painin- ja mittalaittein. Laboratoriossa ei ollut mahdollista suorittaa testiä esim. tietokoneen ohjaamana. Testi piti tehdä käsikäyttöisesti ja mittareiden arvot piti tallentaa myös käsin ylös kirjoittamalla. Testausta ei ollut myöskään mahdollista tehdä siten, että sylinterin vetoliike jatkuisi tasaisesti kautta koko mitattavan kokonaissiirtymän ja mittaus tapahtuisi jatkuvana reaaliaikaisesti. Testi piti suorittaa tällaisten mittaus- ja ohjauslaitteiden puuttuessa jaksottain.

Testi suoritettiin ohjaamalla vetosylinterin liikettä käsikäyttöisesti. Vetosylinterin veto pysäytettiin 13 kertaa ja jokaisen pysäytyksen aikana luettiin mittareista voima- ja siirtymäarvot. Vetosylinterillä vedettiin paininlevyä niin kauan kunnes standardin määrittelemä 125 millimetrin siirtymä saavutettiin. Loppujen lopuksi rakennetta kuormitettiin yli 140 millimetrin siirtymään saakka.



Kuva 5.3.1. Testaus meneillään.

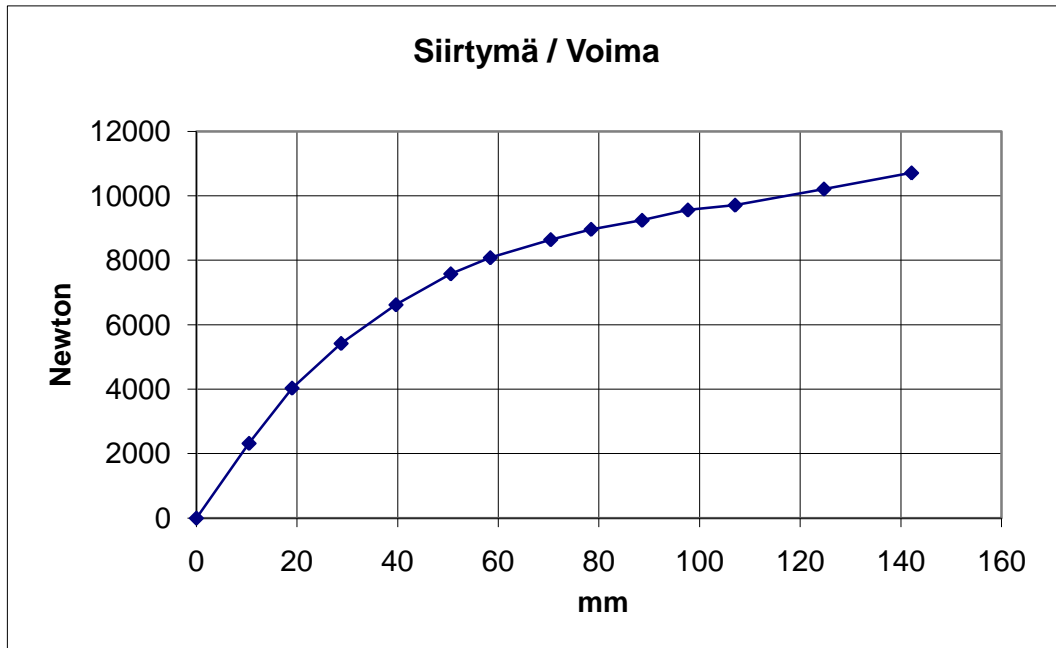


Kuva 5.3.2. Painaminen suoritettuna loppuu saakka.

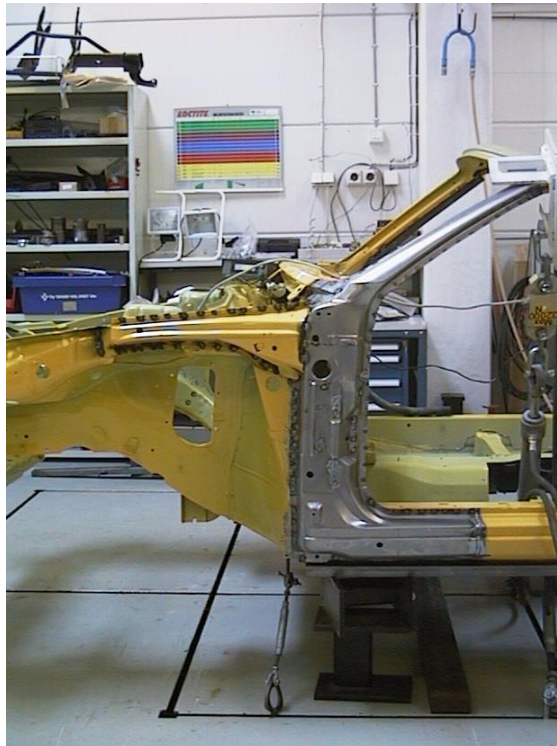


Kuva 5.3.3. Koestuksen lopputilanne takaa päin nähtynä.

Testin tulokset siis kirjattiin käsin ja ne ovat seuraavanlaiset (kts. kuva 5.3.4.): Näistä kolmentoista mittauspisteen arvoista saatiin aikaan seuraavassa kappaleessa esitettävä voima/siirtymä-käyrä. Mittapisteiden väliin on ekstrapoloitu käyrä havainnollistamaan siirtymä/voima-suhteen kehittymistä.



Kuva 5.3.4. Mittaustulokset

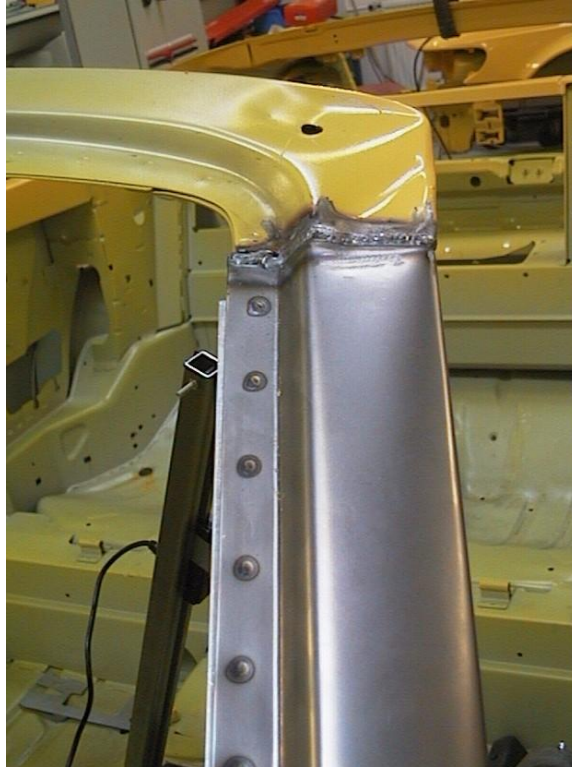


Kuva 5.3.5. Koestuksen lopputilanne vasemmalta sivulta nähtynä

Korin rakenteen taipuivat varsin tasaisesti kauttaaltaan ja paikallisia suuria muodonmuutoksia löydettiin silmämääräisellä tarkastelulla vain kahdesta kohdasta. Painamisen aiheuttama vipuvoima lommahdutti A-pilarin vertikaaliosan takareunaan syvän lommon. Tasapintainen painin itsessään taas puristi kosketuskohtansa lähiympäristön pintapellit samaan tasomaiseen muotoon.



Kuva 5.3.6. Syvä paikallinen lommahdus A-pilarin vertikaaliosan takapinnalla

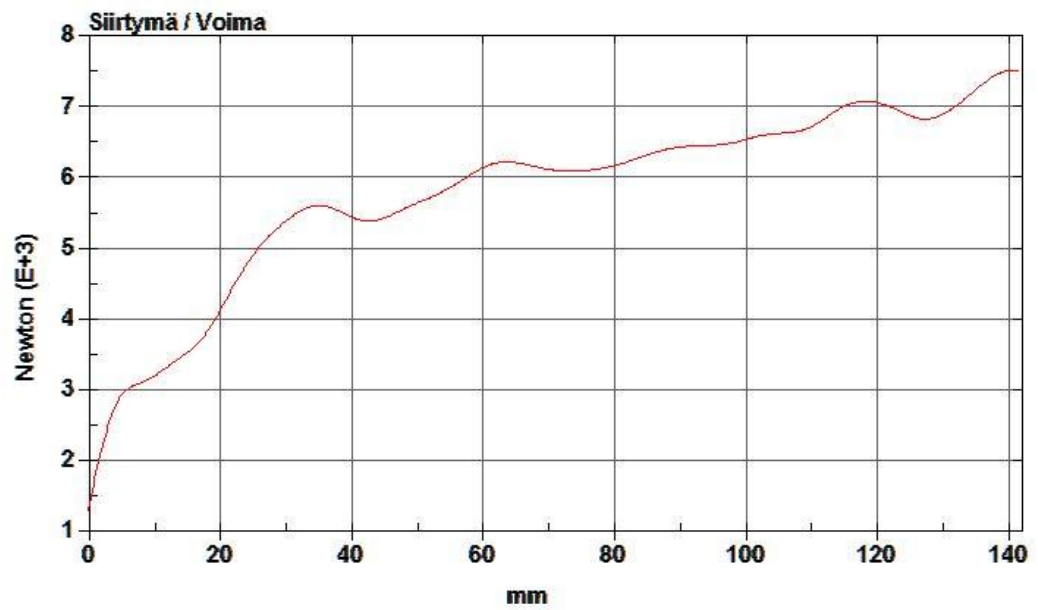


Kuva 5.3.7. Paininlevyn aiheuttama lommahdus A-pilarin yläpäässä.

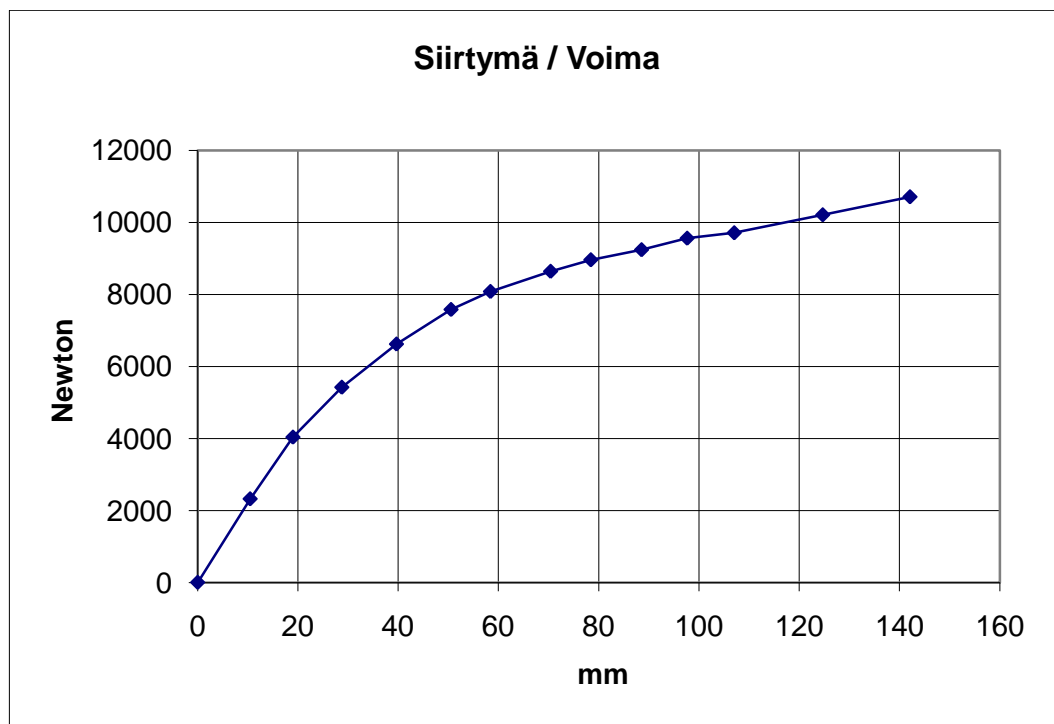
6 TESTITULOSTEN VERTAILU

FEM-analyysillä ja oikean auton korin testeillä saadut tulokset poikkeavat jonkin verran toisistaan. Suurin poikkeama on siinä, että FEM-analyysissä paininlevyyn kohdistuva maksimivoima oli 7,6 kN. (142 mm siirtymän kohdalla). Fysikaalisessa testissä vastinvoima samassa kohdassa on n. 10,8 kN. Virtuaalitestin maksimivoima on vain 70,4 % todellisesta mittauksesta.

Ympäriajotestistandardin määrittämässä 125 mm painumassa ero virtuaalitestin ja todellisen testin välillä on vielä vähän suurempi kuin edellä. FEM-analyysin mukaan voima tuossa kohdassa n. 6,8 kN ja todellisessa testissä n. 10,1 kN. Virtuaalitestin mukaan voima on vain 67,3 % todellisesta mittauksesta.



Kuva 6.1. FEM-analyysin tulos (suodatettu SAE-60 Hz –suodattimella).



Kuva 6.2. Fysikaalisen testin tulos.

6.1 Virhelähteet simulaatiossa

Virtuaalilaskelman tulokset voima/siirtymä-suhteesta poikkesivat siis todellisesta testistä varsin paljon. Virhelähteitä, jotka voivat aiheuttaa tämän eron, on hyvin paljon.

Du Bois (1999, s. 1.15, 1.17) mukaan eroja virtuaalitestissä aiheuttavat:

- Niukkahiilisen seostamattoman teräksen plastisuuden teoria ja sen numeerinen implementointi.
- Lujittuminen eri muodoissaan niukkahiiliselle seostamattomalle teräkselle.
- Numeeriset menetit: ali-integroitujen kuorielementtien käyttö ja penalty-perustaiset kontaktialgoritmit.
- Liian karkeat verkot sallivat vain alhaiset nurjahtamismoodit ”curvature buckling modes”.
- Pulttiliitosten ja pistehitsausten murtuminen ja yleinen toiminta.
- Lähtöjännitysten huomioonottaminen on vaikeaa, kun käytetään eksplisiittistä integrointia.
- Realistiset kitkamallit puuttuvat.

Mao et al. (2005, s. 8) mukaan virhettä virtuaalisissa ympäriajotesteissä aiheuttavat:

- Materiaalien mallit.
- Osien kiinnitys toisiinsa (kiinnityksen mallintaminen).

Lisäksi edellä mainittujen seikkojen lisäksi tässä työssä havaittiin, että virhettä voisivat aiheuttaa:

- Auton oikean puolen A-pilarin vahvikeputki oli eri tavalla mallinnettu kuin se oli todellisessa auton korissa.
- Osien välisiä maalin aiheuttamia liimaliitoksia ei oltu mallinnettu.
- Pintamallit laaditaan ääri viivoista ja mittapisteistä eli suurella todennäköisyydellä kappaleenmuoto ei ole aivan alkuperäinen vaan approksimoitu.
- Mittapisteiden ja rautalankamallin referenssipisteiden poikkeava sijainti voi aiheuttaa virheen osien geometriaan.
- Elementtien suuntavektorit voivat olla väärään suuntaan.

- Mallin kiinnitys alustaan ei täysin vastaa fysikaalista testiä.
- Mallin lattiassa ollut aukko (aukko, joka oikeassa mallissa oli instrumentoinnin lattiaan kiinnittämistä varten) aiheuttaa erilaisen vasteen erilaisten kiinnitystapojen vuoksi.
- Auton peräpäätä ei oltu mallinnettu.
- 3D-mittakoneelta saadut pisteet ovat virheellisen asentotunnistuksen tai laitteen kalibroinnin puuttumisen vuoksi vuoksi väärässä kohdassa.

6.2 Virhelähteet fysikaalisessa testissä

Fysikaalisessa testissä virhettä saatuun voimalukemaan voivat aiheuttaa monet virhelähteet:

- Voimamittari näyttää väärin.
- Testattava kori liukuu tai joustaa kiinnityksissään (erityisesti sivuttain).
- Testaaja on lukenut mittaria väärin.
- Testaaja on kirjoittanut tulokset väärin.
- Teräksen viruminen mittarin lukemisen kuormitusten lisäyksen taukojen aikana.

6.3 Auton korin FE-analyysien luotettavuuden parantaminen

Kuten virtuaalitestin ja fysikaalisen testin antamien tulosten suuresta erosta voidaan havaita, on virtuaalitestin luotettavuudessa paljon parantamisen varaa. Yksittäisessä testissä parantamisen varaa löytyy paljon. Jo kahdessa edellisessä kappaleessa mainittujen jokaisen seikan huomioonottamisessa riittää tekemistä.

Du Bois (1999, 1.23) kertoo yleisellä tasolla miten FEM-analyysien luotettavuutta parannetaan:

- Hienojakoisemmat elementtiverkot.
- Parempilaatuiset elementtiverkot.
- Parannetut numeeriset algoritmit.

7 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tehtiin elementtimenetelmällä henkilöauton korin malli, jolle tehtiin virtuaalinen ympäriajoturvallisuustesti eksplisiittiseen aikaintegrointiin perustuvalla laskentamenetelmällä. Oikean auton korille tehtiin tämä sama testi, jolloin pystyttiin vertaamaan tuloksia.

Virtuaalitestin ja todellisen testin tulosten välillä havaittiin varsin suuri ero. Todettiin, että mahdollisia virhelähteitä on paljon. Tehtyä FEM-mallia täytyy jatkossa vielä parantaa. Mallinnettuja elementtiverkkojen laatua täytyy parantaa, erilaisia osien kiinnitystapoja kannattaa tutkia sekä materiaalien ja kontaktien erilaisia numeerisia algoritmeja täytyy kokeilla, jotta virtuaalimalli voisi vastata paremmin todellisuutta ympäriajoturvallisuustestissä.

Tutkimuksen yhteydessä selvitettiin alan julkaisuista tämänhetkinen tapa tehdä auton koko korin virtuaalitestimalleja.

Tämän tutkimuksen sivutuotteena saatiin selville se millaisessa ajassa tutkimuksessa käytetty tietokone pystyy ratkaisemaan tutkimuksen virtuaalitestin. Oikean auton testin avulla saatiin tietää, paljonko lisävahvikkeilla varustettu kori kestää ympäriajoturvallisuustestissä.

LÄHDELUETTELO

A Finite Element Primer. 1992. 3. painos. NAFEMS Ltd. Glasgow. 277 s. ISBN 0-903640-17-1.

LS-Dyna, Consistent units. LS-Dyna –ohjelmiston tukisivut internetissä,

<http://www.dynasupport.com/howtos/general/consistent-units>.

Du Bois Paul A. 1999. Kurssimoniste: Crashworthiness Engineering with LS-DYNA. 484 s. Kurssi: LS-DYNA, Advanced Training Class in Impact Analysis. Lingköping 20-23.4.2000. Engineering Research Ab.

Chee Niw Chang & Bakar Abd Rahim Abu. 2007. Finite element modeling of arc welded joints. 16 s. Jurnal Mekanikal, June 2007, No. 23, sivut 15-30.

Duddeck Fabian. 2007. Multidisciplinary optimization of car bodies. Springer Berlin Heidelberg . ISSN 1615-147X (Print) 1615-1488 (Online). Issue Volume 35, Number 4 / April, 2008. Category Industrial Application. DOI 10.1007/s00158-007-0130-6. Sivut 375-389. Subject Collection: Engineering. SpringerLink Date Friday, June 01, 2007.

FMVSS 216. 1995. Roof Crush Resistance, Passenger Cars. Federal Motor Vehicle Safety Standard (49 CFR Part 517). Issue:2, Apr/1995. Amerikan Yhdysvallat. INTEREUROPE. 18 sivua.

Hakala Matti K. 1980. Lujuusopin elementtimenetelmä. 4. painos. Otapaino. Espoo. Otatieto. 490 s. ISBN 951-671-395-5.

Hellen Trevor. 2003. How to Use Elements Effectively. 1. painos. NAFEMS Ltd. Glasgow. 114 s

Jacob Paul & Goulding Lee. 2002. An Explicit Finite Element Primer. 1. painos. NAFEMS Ltd. Glasgow. 128 s. ISBN 1-874376-45-X.

Mao Mingzhi, Chirwa E. C., Chen T. 2005. Vehicle Roof Crush Modelling & Validation. 12 s. 5 th European LS-DYNA Users Conference, Methods and Techniques. Birmingham.

Palmonella Matteo, Friswell Michael I., Mottershead John E., Lees Arthur W. 2003. Finite element models of spot welds in structural dynamics: review and updating. 13 s. Computers and Structures 83 (2005) 648-661. Elsevier. Science Direct.

Schweizerhof Karl, Walz Matthias, Rust Wilhelm, Franz Ulrich, Kirchner Markus. Quasi-static Structural Analysis with LS-DYNA –Merits and Limits. 18 s. Proc. 3. European LS-DYNA Users Conference, Göteborg, Ruotsi. 14-15.6. 1999.

Volz Andreas K. 1998. Spot weld modeling for crash computations, requirements and new functionalities in LS-Dyna, Version 940. 5. 18 sivua. International LS-DYNA Users Conference, Southfield 1998.