

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Konetekniikan koulutus

Jarkko Kukkonen

MURTOTESTAUKSEN SIMULOIMINEN FEM-MENETELMÄLLÄ

Toukokuu 2019



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019
Konetekniikan koulutus
Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä
Jarkko Kukkonen

Nimeke
Murtotestauksen simulointi FEM-menetelmällä

Toimeksiantaja
Abloy Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää, voiko murtotestausta suorittaa ja korvata FEM-simuloinnin avulla. Työssä käydään myös läpi, missä vaiheessa tuotesuunnittelua FEM-simulointi olisi hyvä ottaa suunnitteluun mukaan ja minkälaisia hyötyjä sillä tuotesuunnittelun eri osa-alueisiin saataisiin. Työssä selvitetään myös implisiittisen ja eksplisiittisen FEM-laskennan eroja.

Työn toteutuksessa perehdyttiin ensin Abaqus-ohjelmiston toimintaan sekä simuloitavaan käytännön murtokokeeseen. Murtotestin simulointia varten rajattiin käytettävät tuotteet ja määritettiin tarkemmin simuloitava tilanne murtotestistä. Simulointia varten testattiin testitilanteesta syntyvä maksimivoima käyttämällä telkeä muistuttavia testipaloja murtotestissä. Testipalojen todellinen kestävyys varmistettiin mittaamalla palojen kesto erillään muista osista koestuslaitteella.

Käytännön murtokokeen maksimivoima auttaa FEM-simuloinnin käyttämistä laajemmin fyysisen murtotestauksen korvaajana ja mahdollistaa paremman FEM-simuloinnin hyödyntämisen tuotesuunnittelun aikana. Selvitetty maksimivoima on kuitenkin vain hyvin spesifisestä testaustavasta syntyvä voima, minkä takia erilaisesta murtotestauksen tilanteesta syntyvää voimaa varten täytyisi tehdä erilaiset testit. Tulevaisuudessa tehtäviä vastaavanlaisia simulointeja vertailemalla todennettuihin käytännön murtokokeisiin saadaan kuitenkin johdonmukainen näkemys simuloinnin ja todellisen tilanteen välille, mikä mahdollistaa käytännön murtokokeiden määrän vähentämisen tuotesuunnitteluprosessin aikana.

Kieli
suomi

Sivuja 35
Liitteet 5
Liitesivumäärä 5

Asiasanat:
FEM, suunnittelu, testaus, murtosuojaus.



THESIS
May 2019
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tikkariinne 9
80220 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author
Jarkko Kukkonen

Title
Burglary Testing by Using FEM Method

Commissioned by
Karelia UAS

Abstract

The purpose of the thesis was to find out if there was a possibility to simulate and replace burglary testing with FEM-simulation. It was also studied when it would be beneficial to take FEM-simulation into the process of the product design and what kind of benefits it would bring to different sectors. The differences of the implicit and explicit FEM methods were also studied.

In the thesis process, the first phase was to get acquainted with the operation of the Abaqus-software and the hands-on burglary test to be simulated. The used products for the burglary test were defined and the exact situation of the burglary test to be simulated was specified. For the simulation, the maximum force of the burglary test was tested using test pieces similar to the bolt. The actual durability of the test pieces was confirmed by measuring the pieces separately with a testing apparatus.

The reported maximum force of the burglary test helps the wider usage of FEM-simulations in replacing the physical burglary tests and allows the better utilization of the FEM-simulations during the product design. However, the studied maximum force is from a very specific test situation, therefore new tests should be done when simulating a different kind of burglary test. Comparing the corresponding future simulations with the physical tests would give a consistent perspective to the real and simulated test statuses, which enables decreasing the amount of physical burglary tests needed to be made in the process of the product design.

Language
Finnish

Pages 35
Appendices 5
Pages of Appendices 5

Keywords
FEM, designing, testing, burglary protection.

Sisältö

Lyhenteet ja termit

1	Johdanto.....	6
1.1	Abloy Oy.....	6
1.2	Opinnäytetyö ja tavoite.....	6
2	Tuotekehitys teoriaa.....	7
2.1	3D-suunnittelun historia.....	7
2.2	Tuotekehityksen vaiheet ja simulointi.....	8
2.2.1	Simultaanisuunnittelu.....	9
2.2.2	Tuotekehitystoiminta ja innovaatioprosessi.....	10
2.2.3	Quality Function Deployment.....	11
3	Finite Element Method.....	13
3.1	FEM yleisesti.....	13
3.1	Eksplisiittinen ja implisiittinen laskenta.....	16
4	Mekaaninen testaus.....	17
4.1	Simuloinnin käyttö mekaanisen testauksen korvaajana.....	18
4.2	Testaustilanteen maksimivoiman määrittäminen.....	18
4.2.1	Maksimivoiman indikaattoritestipalat.....	18
4.2.2	Maksimivoiman määrittäminen.....	21
5	Abaqus-ohjelmiston perusteet.....	22
6	Lukkorungon murtotestauksen simulointi.....	25
6.1	Materiaalien määrittäminen ja todellinen vetokäyrä.....	26
6.2	Simuloinnin vaiheen määrittäminen.....	27
6.3	Tuennat ja voima.....	28
6.4	Verkotus.....	29
7	Simuloinnin tulokset.....	30
8	Pohdinta.....	30

Liitteet

Liite 1	Tuotekehitysprojektin toimintavaiheet
Liite 2	Testipalan mitoituspiirustus ja voiman sijainti
Liite 3	Kuvia testipalojen voimankestomittauksesta
Liite 4	Kuvia testatuista testipaloista
Liite 5	Kuva vääntyneestä testipalasta

Lyhenteet ja termit

CAD	Computer Aided Design.
CAE	Computer Aided Engineering.
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy -tila, huomioitava eksplisiittisessä laskennassa.
FEA	Finite Element Analysis, FEM:iä käyttävä analyysi.
FEM	Finite Element Method, Elementtimenetelmä, lujuuslaskennassa käytetty menetelmä.
Klossi	Puu-, metalli- tai betonikappale, johon lukko tai vastalevy asennetaan testauksen ajaksi ja joka siten vastaa karmia tai ovea.
Mesh	Elementtiverkko FEM analyysissä.
QFD	Quality Function Deployment, menetelmä ryhmän päätöksenteon tueksi.

1 Johdanto

1.1 Abloy Oy

Abloy on osa ASSA Abloy -konsernia, joka on maailman johtava oviympäristöratkaisujen toimittaja. Abloy toimii yli 90 maassa ja työllistää yli 800 henkilöä kotimaassa sekä 160 henkilöä kansainvälisissä myyntiyksiköissä. Liikevaihdosta noin 60 % tulee kansainvälisestä liiketoiminnasta. [1.]

Abloyn Joensuun tehdas on perustettu 1968 ja onkin nykyään ainoa Abloyn tehdas, Björkbodan tehtaana sulkeuduttua vuoden 2018 aikana. Abloy on valittu vuonna 2016 Suomen arvostetuimmaksi design-brändiksi ja vuonna 2018 Suomen arvostetuimmaksi brändiksi sekä Vuoden Turvallisuusalan yritykseksi [1 + 2].

1.2 Opinnäytetyö ja tavoite

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia, voiko lukon murtotestausta simuloida elementtimenetelmällä ja kuinka mekaanista testausta voisi korvata simuloituilla testeillä. Mekaaninen testaus on hidasta ja vaatii aina fyysisen osan tai tuotteen, että testi voidaan suorittaa. Tarkoituksena oli kartoittaa, minkälaisia hyötyjä FEM-simulointi käytettynä jo tuotesuunnitteluvaiheessa tuo ja voiko tuotteen tai osan heikkoudet huomata ennen varsinaisia mekaanisia testejä.

Työssä käydään läpi lukkorungon fyysistä testausta yleisesti ja hieman tuotekehitysprosessia. Lisäksi kerrotaan hieman elementtimenetelmästä ja simulointiohjelmistosta, jona tässä työssä toimii Abaqus/CAE 2018 -ohjelmisto. Valitaan simuloitava testi ja mitataan

fyysisessä testissä syntyvä maksimivoiman suuruusluokka. Lopuksi vertaillaan simuloitujen testauksen tuloksia mekaaniseen testaustulokseen ja varmistetaan simuloinnin paikkansapitävyys.

Työssä keskeisenä ajatuksena oli, missä vaiheessa tuotesuunnittelua simulointia voisi hyödyntää tehokkaasti ja mitä testejä voisi mahdollisesti korvata simuloimalla. Lopuksi tulokset on tietenkin aina varmennettava fyysisellä testauksella mutta simuloinnin avulla voisi olla mahdollista saada fyysinen testi läpi heti ensimmäisellä kerralla.

2 Tuotekehitys teoriaa

Tässä osiossa käydään läpi tietokoneavusteisen tuotekehityksen syntyä, tuotteen nykyaikaista 3D-suunnittelun peruseriaatteita ja tuotekehitysprosessia. Tuotekehityksessä tarkastellaan lyhyesti tuotekehityksen kokonaisvaltaisuutta ja mihin osa-alueeseen simulointi kannattaa ottaa mukaan.

2.1 3D-suunnittelun historia

Tuotantoautomaation ja numeerisen ohjauksen kehitys 1950-luvulla tekivät mahdolliseksi tuotteen tiedon esittämisen tietokoneella. Aluksi tietokoneella ymmärrettävä tieto oli vain geometriaa ja 1960-luvun alussa alkoi kehittyä yksinkertaisia tietokoneavusteisia piirtämisen menetelmiä, joihin kuuluvat viivamallit, parametripinnat ja -käyrät. 1990-luvulla tietokoneavusteinen suunnittelu eli CAD alkoi kehittyä huimasti ja nykyaikaiset CAD-järjestelmät mahdollistavat mm. yksittäisten osien mallintamisen tarkasti, kokonpanojen luomisen eri osista, visualisointia ja simulointia. Tuotemallien sisältämät tiedot siirtyvät CAD-järjestelmästä toiseen mahdollistaen sovellusten kehittymisen ensisijaisesti eri osa-alueille. [3, 7.]

2.2 Tuotekehityksen vaiheet ja simulointi

Tuotekehitys voidaan Tapani Jokisen mukaan jakaa neljään eri toimintavaiheeseen, jotka ovat: käynnistäminen, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely [4, 14]. Toimintavaiheiden välinen suhde on esitetty liitteessä 1. Tyypillisesti viimeistelyvaihe on näistä eniten aikaa vievä (60 % käytetystä ajasta), kehittämisvaihe seuraavaksi (25 %) ja luonnosteluvaiheeseen sekä esitutkimukseen kuluessa vain 15 % tuotekehitysprosessiin käytetystä ajasta. [3, 20.]

Elementtimenetelmällä (FEM, Finite Element Method) voidaan tarkastella kappaleen rakenteen tai osien kestävyyskykyä ja optimoida esimerkiksi osien paksuuksia tai muotoja. FEM-analyysillä voidaan selvittää mm. voimia, jännityksiä, vääntymiä ja paineita sekä nykyään myös virtaus-, värähtely- ja väsymisanalyysijä. FEM-analysointi onkin nykyään keskeinen osa tuotekehitystä. Oikein tehdyllä analysoinnilla voidaan varmistua tuotteen suunnittelun oikeellisuudesta ja vähentää tuotekehityksessä tarvittavaa työmäärää, millä saavutetaan säästöjä ja voidaan jopa vähentää tuotesuunnitteluprosessin kokonaiskestoja. [3, 159.]

Simulointia voi käyttää hyödyksi jo luonnosteluvaiheessa (liite 1) ratkaisumahdollisuuksien kartoittamisessa. Esimerkiksi jos on selkeä käsitys tuotteen rakenteen kannalta keskeiseen osaan kohdistuvista voimista, voi ratkaisuvaihtoehtoa testata simuloimalla. FEM-analyysin avulla voidaan myös määrittää suunnittelun lähtöarvoja [3, 159]. Simulointia apuna käyttäen on mahdollista testata myös nopeasti hyvinkin erikoista luonnosta, jolloin tulee parempi käsitys vaihtoehdon potentiaalista.

Simulointia voi käyttää myös kehittelyvaiheessa ratkaisujen optimoinnissa (liite 1) [3, 159]. Simuloinnilla voidaan tutkia erilaisia muotovaihtoehtoja ja materiaaliratkaisuja tuotteen eri osissa. Myös tuotteen osien välistä mekaniikkaa voi testata erilaisilla dynaamisilla simuloinneilla, kuten esim. Solidworks 3D CAD -ohjelmiston Motion-lisäosalla. Liikedyneamiikan simuloinnilla saadaan selville monimutkaisten osien välistä käyttäytymistä, kuten voimien välittymistä tai nopeuksia osien eri pisteissä.

Fyysinen testaus vie paljon aikaa ja tilaa: testausta varten joudutaan tilaamaan tai valmistamaan protomallin osat ja suorittamaan jopa viikkoja kestävä testit [5]. Syklitestit voivat kestää muutamasta tunnista muutama viikkoon riippuen testistä. Tänä aikana ja testiä valmistellessa testauslaite on varattu tuotteen testaukseen, eikä laitteella voi suorittaa muita testejä. Protovaiheessa tuotetta saattaa joutua testaamaan useita kertoja, jos tuotetta muutetaan esimerkiksi edellisen testin mentyä pieleen. Tarvittavien testauskertojen vähentäminen tuo siis selkeitä säästöjä ja nopeuttaa tuotekehitysprosessia. FEM-simulointia voi hyödyntää kehittelyosion loppuvaiheessa, ennen protomallin valmistamista. Tässä vaiheessa voidaan testata tuotteen kriittisiä kohteita tai jopa kokonaisen tuotteen CAD-kokoonpanomallia ja varmistua, että tuote kestää sille määritettyjä voimia tai tarpeeksi monta toimintasykliä.

Valmiin tuotesuunnitelman FEM-simulointi voidaan toteuttaa samanlaisilla rajaehdoilla kuin varsinainen fyysinen testaus protomallilla tai nollasarjalla. Simuloinnissa tulee yleensä myös ilmi, missä kohtaa tuotetta/osaa ovat kaikkein kriittisimmät voimien keskittymät ja onko simuloinnin avulla testattava kappale miten lähellä tuotteelle asetettuja maksimitavoitteita. Tämän avulla voidaan osaa optimoida esimerkiksi ohuemmaksi, jos osaan kohdistuvat rasitukset ovat tarpeeksi alhaisia, mikä synnyttää säästöjä materiaalikustannuksissa.

2.2.1 Simultaanis suunnittelu

Simultaani- eli rinnakkaissuunnittelu on kokoonpanoissa nykyään laajasti käytössä oleva suunnittelutapa. Tuotteet ovat monimutkaistuneet ja osien määrä kasvanut, minkä takia useampi suunnittelija suunnittelee saman tuotteen eri osia samanaikaisesti. Samaan aikaan tuotteiden elinkaaret ja toimitusajat ovat lyhentyneet huomattavasti verrattuna muutama vuosikymmen taaksepäin. Ajasta on tullut tärkeä kilpailutekijä laadun lisäksi. [3, 6, 226.]

Tuotekehityshankkeiden vaativuus ei ole kuitenkaan merkittävästi vähentynyt vaan vaativuus on pikemminkin kasvanut. Tämän ja tuotteiden eliniän lyhenemisen takia perinteisempi peräkkäin etenevä tuotekehitysprosessi on korvautumassa enemmän rinnakkaisella työskentelytavalla, jossa tuotekehitysprosessi toimii osittain samanaikaisesti markkinoinnin ja valmistuksen kanssa rinnakkain. [3, 22–23.]

Rinnakkaisen tuotekehitysprosessin hyötynä on mahdollinen ”ideasta tuotteeseen” kuluvan ajan vähentäminen. Suurimpana haasteena on, miten tehdä järkeviä päätöksiä kehitysprosessin alussa [3, 23]. Kokoonpanojen osien samanaikaisen suunnittelun lisäksi voidaan suorittaa erilaisia analyysejä kesken tuotesuunnitteluprosessin [3, 227]. FEM-simuloinnilla on mahdollista löytää toimivia ja parempia ratkaisuja aikaisemmassa vaiheessa tuotekehitysprosessia, mikä säästää aikaa ja voi lyhentää tuotekehitysprosessiin kuluva kokonaisaikaa merkittävästi.

2.2.2 Tuotekehitystoiminta ja innovaatioprosessi

Tuotekehitystoiminnalla tarkoitetaan prosessia, jonka tarkoituksena on kehittää uusi tuote tai parantaa nykyistä tuotetta. Prosessin lopputuotosta kutsutaan tuotteeksi tai innovaatioksi, joka on nykyään kasvavissa määrin käytetty synonyymi uudelle tuotteelle. [6, 15.]

Innovaatioprosessi on laaja-alaisempi kokonaisuus: Tuotteen valmistuskelpoisuuden lisäksi mietitään myös tuotteen markkinointia, ekologisuutta, kierrätystä, kulttuuria, liiketoimintaa ja jopa politiikkaa. Innovaatiotoimintaan osallistuvat nykyisin siis myös muut tahot kuin vain tuotesuunnittelijat, esimerkiksi markkinointi, valmistus ja muotoilijat. [6, 15.]

Innovaatioprosessissa kohdataan monenlaisia haasteita:

Kompromissit: Tuotteessa voitaisiin käyttää kevyempää, helpommin muotoiltavaa tai valmiiksi korroosiokestävä materiaalia, mutta hinta voi nousta korkeaksi. Haasteena on tasapainotella monien eri kompromissien välillä ja löytää optimaaliset ratkaisut. [6,16.]

Dynamiikka: Maailma ympärillä muuttuu, taloustilanteen nousevat ja laskevat, teknologiat kehittyvät ja kilpailijat lanseeraavat omia innovaatioitaan. Päätöksien tekeminen innovaatioprosessin eteenpäin viemiseksi on haastavaa, sillä jokin asia on voinut jo muutama kuukauden päästä muuttua radikaalistikin. [6,16.]

Yksityiskohdat: Tuotteen yksityiskohtiin voi olla olemassa useampi ratkaisu, esimerkiksi kiinnitetäänkö osat toisiinsa hitsaamalla, niittaamalla vai ruuviliitoksilla. Vastaväntäisiä ratkaisumahdollisuuksia voi olla pienessäkin tuotteessa useita. Tällaiset päätökset voivat vaikuttaa hintaan, saatavuuteen ja valmistusnopeuteen. [6,16.]

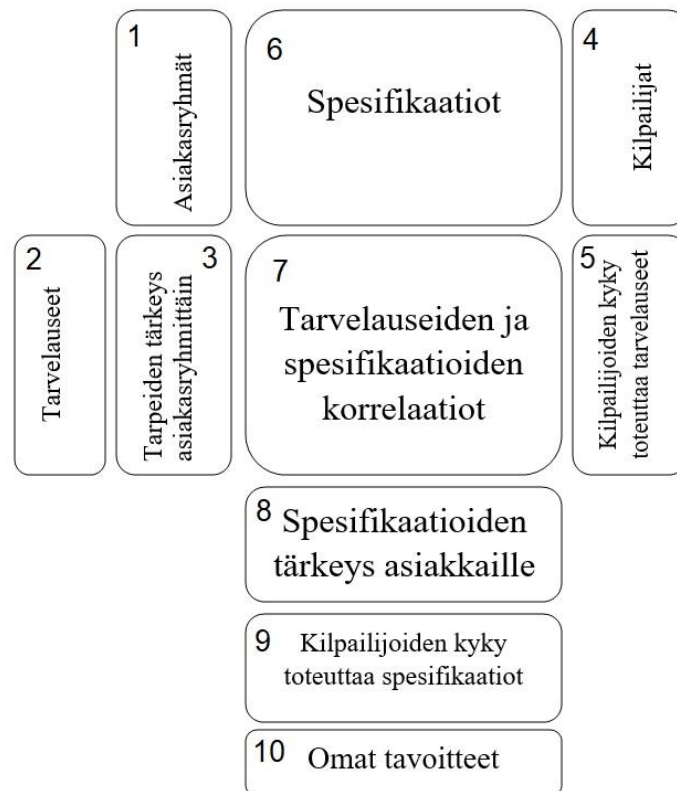
Talous: Uutta tuotetta kehittäessä kuluu aikaa ja rahaa. Tuotteen valmistaminen ja markkinointi tarkoittavat investointeja, joten tuotteesta pitäisi saada tarpeeksi katetta, millä täytyy kattaa innovaatioprosessin ja valmistuksen kulut. Tuotteen hinta pitää saada sellaiselle tasolle, jonka asiakas on valmis maksamaan ja että tuotteesta saataisiin voittoa, jotta uusi innovaatioprosessi on mahdollista toteuttaa. [6,16.]

Aikapaineet: Tuote on saatava markkinoille tarpeeksi ajoissa. Tämän takia monet aiemmin esitetyt päätökset joudutaan tekemään vajaille taustatiedolla ja joskus jopa varsin nopeasti. [6,16.]

2.2.3 Quality Function Deployment

Quality Function Deployment, lyhennettynä QFD, sai alkunsa 1970-luvun puolivälissä Japanissa, josta se levisi 80-luvun loppupuolella Amerikan Yhdysvaltoihin. QFD:ssä on tarkoitus muuttaa asiakastarpeet mitattaviksi arvoiksi ja arvioida niiden tärkeys eri sidosryhmissä. QFD auttaa konseptisuunnittelua keskittymään tärkeisiin ominaisuuksiin. QFD:n avulla voi myös verrata uutta tuotetta vanhaan tai kilpailijoiden tuotteisiin. QFD pakottaa ensin miettimään, mitä on saatava aikaan, jonka jälkeen voidaan vasta miettiä, kuinka nuo tavoitteet voidaan tuotteessa saavuttaa. [6, 73.]

Laatutalo (kuvio 1) on yksi QFD-menetelmän keskeisistä elementeistä. Laatutalo rakennetaan numerojärjestyksessä alkaen asiakasryhmien tunnistamisella. Asiakasryhmien jälkeen voidaan selvittää asiakkaiden tarpeet, josta syntyy tarvelauseet. Eri asiakasryhmien tarpeet asetetaan numeroasteikolla tärkeysjärjestykseen. [6, 73.]



Kuvio 1. QFD-menetelmän laatutalo (mukaihen, Hietikko ja Savonia-ammattikorkea koulun kuntayhtymä, 2008)

Kohdassa 4 tarkastellaan oman tuotteen kanssa kilpailevat tuotteet. Kilpailija voi olla myös jokin toinen oma tuote, jota vastaan kehitetään parempaa tuotetta, tai tilanne ilman tuotetta. Seuraavaksi arvioidaan kilpailevien tuotteiden tarvelauseiden täyttäminen, minkä jälkeen määritetään, kuinka uudelle tuotteelle asetettavat vaatimukset mitataan. Nämä perustuvat asiakastarpeista muodostuneisiin spesifikaatioihin. Kohdassa 7 asetetaan numeerisella asteikolla spesifikaatioiden ja asiakastarpeiden väliset relaatiot. Seuraavaksi arvioidaan eri spesifikaatioiden merkityksen tärkeyttä asiakasryhmille ja arvioidaan myös kilpailevien tuotteiden kykyä toteuttaa nämä spesifikaatiot. Lopuksi sijoitetaan omalle tuotteelle asetetut tavoitteet, joiden pohjalta suunnitteluprosessia voidaan viedä eteenpäin. [6, 73–74.]

3 Finite Element Method

3.1 FEM yleisesti

Tietokoneella voidaan käyttää numeerista FEM-menetelmää, jonka avulla saadaan ratkaistua osan tai kokoonpanon kuormitustilanteet, lämmön siirtymät tai nesteen virtauksia. FEM tarvitsee kuitenkin joitain lähtöarvoja, jotta laskenta voidaan suorittaa: geometrinen malli, reunaehdot, kuormitukset ja materiaalitiedot [3, 161]. Geometria voi olla umpinainen kiinteämuoto (solidi), pintamalli tai rautalankamalli. Useimmiten käytettävä tyyppi on solidi, mutta kappaleen ollessa yksinkertainen, esimerkiksi ovi, voidaan käyttää myös pelkkää tasomaista pintamallia. Rautalankamalli sopii hyvin palkkimaisiin rakenteisiin, jossa kaikki palkit noudattavat samaa poikkileikkausmuotoa (esim. teline).

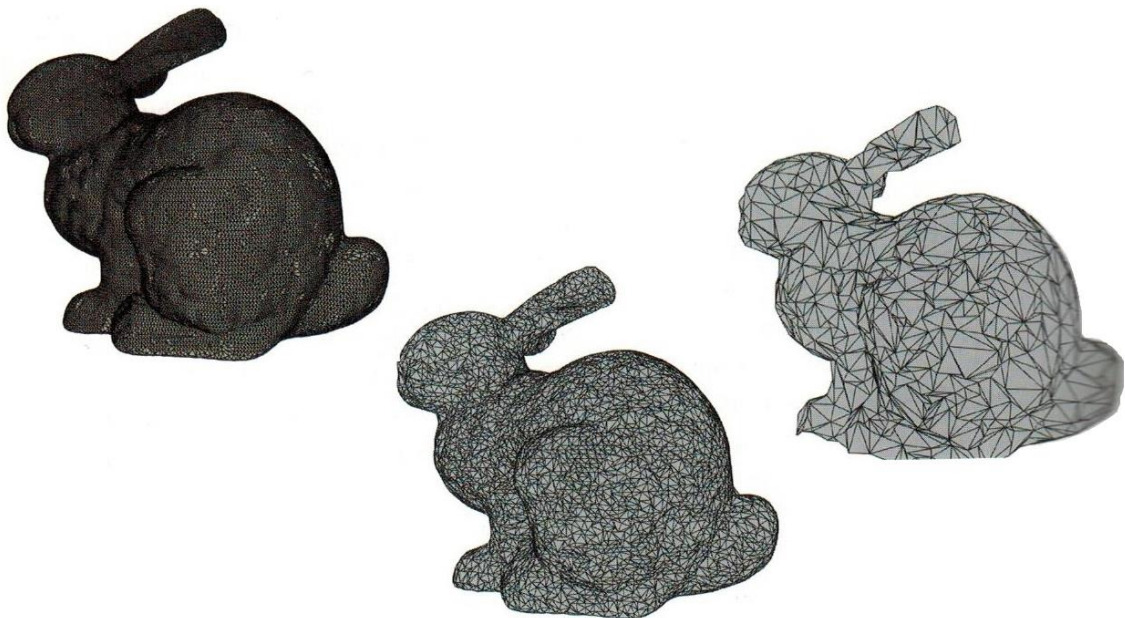
FEM-menetelmän voidaan sanoa jakaantuvan kolmeen eri vaiheeseen:

”Esiprosessoinnissa (preprocessor, mesher) kirjataan analyysin tiedot, annetaan voimat, reunaehdot ja materiaaliarvot sekä luodaan verkko (yleensä) kolmiulotteiselle kappaleelle. Kappale on joko 3D-CAD -järjestelmästä tuotu tai FEM-ohjelmassa tehty. Ratkaisuvaiheessa (solver) lasketaan kappaleen jäykkyyssmatriisi. Jälkiprosessoinnissa (postprocessor) näytetään tulokset ja suoritetaan raportointi.” [3, 162.]

Ennen analyysia, geometriselle mallille asetetaan todellista tilannetta vastaavat vapausasteet ja rajoitetaan kappaleen liikkuminen muilta osin. Analyysiohjelmistoilla pystyy määrittämään, mistä kohdista kappale kiinnitetään (fix/fixture) paikoilleen. Kiinnityksessä voidaan käyttää tasoja, akseleita, särmiä tai pisteitä riippuen, minkälaista kiinnitystä tarvitaan tai haetaan. Tämä onkin yksi analyysin hankalimmista vaiheista. Tukireaktioiden sijoittelussa tapahtuu helposti ali- tai yliasettamista [7, 125].

Osiin tai kokoonpanon osasiin vaikuttavat voimat täytyy lisätä. Voimat voivat olla mm. staattista, momenttia, painovoimaa, painetta tai erilaisia voimien yhdistelmiä, kuten laakerivoima.

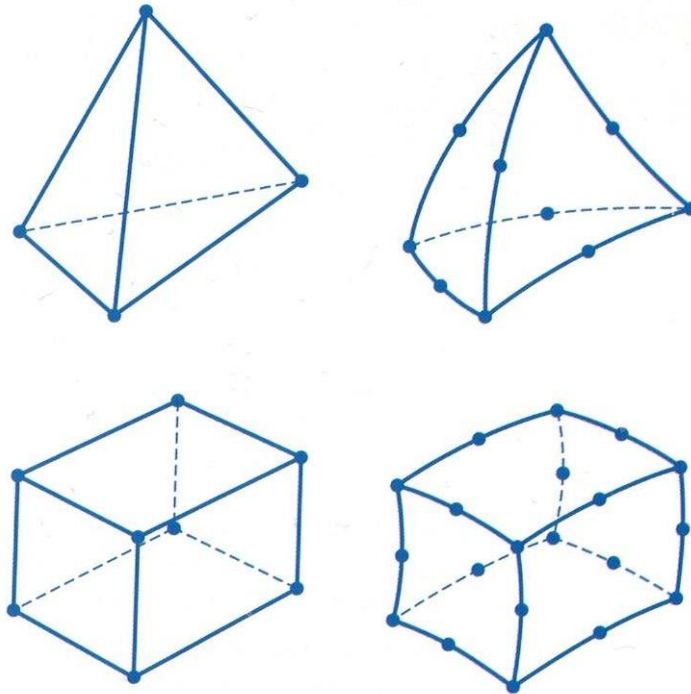
Ennen kuin analyysi voidaan suorittaa, täytyy analysoitava kappale jakaa elementteihin, eli tilavuusalkioihin [3, 161]. Tämä toiminto on ohjelmistoissa yleensä nimellä verkotus (mesh). Kappaleeseen luotu verkko toimii kuin iso kolmiulotteinen elementtiverkko, jonka tilavuusalkioiden ohjauspisteet ovat yhteydessä toisiinsa. Tilavuusalkioiden koon määrittäminen on analysoijan määritettävä sopivaksi. Liian isolla elementtikoolla tulokset ovat epätarkkoja, mutta liian pienellä elementtikoolla laskentaan kuluva aika kasvaa moninkertaiseksi. Joissain ohjelmistoissa voidaan myös määrittää erikokoista verkotusta eri alueisiin. Tiheämpää verkotusta on hyvä käyttää kriittisissä kohdissa, jotka ovat yleensä nurkkia, muotojen yhtymäkohtia tai reunapyöristykset. Sopiva elementtikoko löytyy kokemuksen ja kokeilun kautta.



Kuva 1. Sama geometria kolmella eri tarkkuudella (69451, 19598 ja 2901 kolmiota) [3, 228]. Tarkkuus vaikuttaa etenkin kaarevilla alueilla sekä muodon että tuloksien oikeellisuuteen.

Tilavuusalkioita on erimuotoisia. Yleisimmin käytetyt muodot ovat yksinkertaiset monikulmiot (tetrat) ja lineaariset neliöt (kuutiot) [3, 162]. Muotoa rajoittaa varsinaisesti vain se, että tilavuusalkion kulmapisteiden on oltava yhteydessä toisiinsa. Yksinkertaisilla

muodoilla laskenta on kevyempää, minkä johdosta niitä käytetään eniten. Elementtikokoa pienentämällä saadaan yksinkertaisillakin muodoilla katettua koko monimutkainen kappale. Joissain sovelluksissa voidaan käyttää myös käyriä (spline), joiden avulla voidaan geometria sovittaa paremmin kappaleen pyöreisiin muotoihin. [3, 161.]



Kuva 2. Kaksi yleisintä tilavuusalkiomuotoa, tetra ja kuutio. Oikealla muodoissa käytetty käyriä. [3, 161.]

Geometrisesta mallista kannattaa poistaa yksityiskohtia, joilla ei ole juurikaan vaikutusta kappaleen lujuuteen. Näin mallista tulee helpommin laskettava. Tällaisia yksityiskohtia ovat monesti pienet viisteet ja pyöritykset, kierteet, reikien senkkaukset ja kokoonpanossa jopa jotkut pienemmän osat. Yksityiskohtien poistamisessa ei ole juurikaan merkitystä pienemmissä, yksinkertaisissa malleissa, mutta isommassa ja monimutkaisemmassa mallissa laskentaan kuluva aika saattaa jopa moninkertaistua yksityiskohtien takia. Jos yksityiskohdat ovat kappaleen kestävyysnäköisiltä merkityksellisiä, kannattaa yleensä yksityiskohdat verkottaa pienemmällä elementtikokolla kuin muu kappale. Isot levyt, joissa on pieniä reikiä, ovat hyvä esimerkki tällaisista tapauksista. [3, 162–163.]

3.1 Eksplisiittinen ja implisiittinen laskenta

FEM laskentaa voi tehdä kahdella matemaattisella tavalla: eksplisiittisesti tai implisiittisesti. Kumpikaan näistä ratkaisumalleista ei ole toiseen nähden mitenkään ylivoimainen, vaan käytettävä ratkaisumallin paremmuus riippuu ratkaistavan ongelman laadusta. Lyhyesti sanottuna, eksplisiittinen analyysi ratkaisee simuloitavan ongelman/mallin tilan ajassa, joka eroaa lähtöajasta [8]. Implisiittinen analyysi sen sijaan ratkaisee yhtälön, joka pitää sisällään simuloitavan ongelman/mallin sekä nykyisen että myöhemmän tilan [8].

Implisiittinen analyysi soveltuu käytettäväksi, kun tapahtumat ongelmassa ovat hitaampia ja venymät pienempiä, kuten staattiset kuormitusilanteet. Implisiittisellä analyysillä ratkaistaan aika-riippuvaisia ongelmia. Implisiittinen analyysi voi kuitenkin olla hyvin aikaa vievää, jos ongelman luonne on dynaaminen tai epälineaarinen. [8.]

Eksplisiittistä analyysiä käytetään ongelmissa, jotka ovat ajasta riippumattomia. Näissä ongelmissa tapahtuu äkkinäisiä iskuja, nopeita liikkeitä tai suuria muodonmuutoksia. Eksplisiittisen analyysillä ratkaistavan aikavälin on oltava kuitenkin tarpeeksi pieni, jotta tulokset pysyvät tarkkoina. Ratkaistavan aikavälin tulisi olla pienempi kuin aika, mikä äänellä menee kulkiessa pienimmän elementin läpi. Tätä kutsutaan *Courant-Friedrichs-Lewy* -tilaksi [9]. Implisiittisessä analyysissä ei tätä tarvitse huomioida. [8].

4 Mekaaninen testaus

Abloyn lukkorungoille suorittamat murtotestit pohjautuvat standardeihin:

- EN 1630 (Pedestrian doorsets, windows, curtain walling, grilles and shutters. Burglar resistance. Test method for the determination of resistance to manual burglary attempts.)
- SFS 5970 (Rakennushelat. Kiinteästi asennettavat lukot ja riippulukot. Murronekestävyys. Vaatimukset ja testausmenetelmät)
- SFS 7020 (Rakennushelat. Kiinteästi asennettavat lukot ja riippulukot. Murronekestävyys. Luokitus.)

Standardit määrittelevät testausasetelman, testaukseen käytettävät työkalut, vaatimukset testaajien ammattipätevyydelle, testausraportin sisältöä, lukoilta vaadittavan kestävyuden ja testaukseen käytettävän ajan. Murronekestävyys mitataan murtautumisaikana: Lukon on kestävä aukeamatta aika, joka on määritetty standardissa SFS 7020. [10.]

Simuloinnin avulla saman lukon testaukset vähenevät ja parhaimmassa tapauksessa tarvitsisi enää suorittaa vain lopullinen varmistustesti. Testauksetojen määrän pienentyessä myös työturvallisuuden riskit pienenevät etenkin niissä testeissä, joissa testaajalla on suuri merkitys testin tulokseen kuten käytännön murtotestissä. Testausmenetelmää saadaan tehostettua, kun saman tuotteen useat testaukset vähenevät.

Simuloimalla voidaan luoda myös erilaisia ympäristön vaihteluita, jotka voisivat muuten olla hankalia toteuttaa, esimerkiksi lämpötilavaikutus. Etenkin muovituotteissa pakkanen voi vaikuttaa tuotteen kestävyteen radikaalisti. Testausympäristön saaminen esimerkiksi -20 °C:seen on haasteellista, yleensä käytännössä jopa mahdotonta ilman suuria investointeja.

4.1 Simuloinnin käyttö mekaanisen testauksen korvaajana

Tämä kappale on sensuroitu.

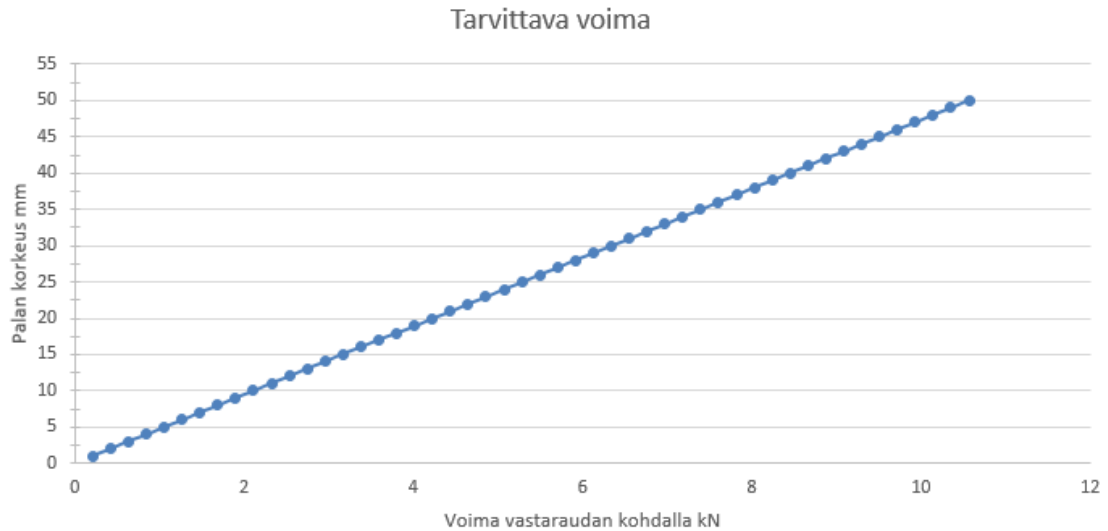
4.2 Testaustilanteen maksimivoiman määrittäminen

Testitilanteen, jossa väännetään ovea ja lukkorunkoa väkisin auki, maksimivoiman määrittäminen tapahtui mekaanisilla, lukkorungon telkeä muistuttavilla teräspaloilla. Testipalojen tarkoitus on myötää tarpeeksi suuren jännityksen kohdistuessa vastaraudan kontaktin alueelle. Testipala asennettiin lukkorungon sisään sekä testipalojen ja lukkorungon väliin asetettiin välilevyt, jotta testipalat liikkuisivat sivuttain mahdollisimman vähän ja sivuttaistuki saisi mahdollisimman suuren pinta-alan.

Tällaisella testillä saadaan suuntaa-antava tulos, joka tällaisen käytännön murtotestin simuloimiseen on riittävä. Oikeassa testaustilanteessa tapahtuman hetkellinen maksimivoima on riippuvainen testinsuorittajan massan ja voimankäytön lisäksi monesta muusta pienemmästä tekijästä.

4.2.1 Maksimivoiman indikaattoritestipalat

Testipaloja valittiin neljä erikokoista, jotta saadaan tarpeeksi kattavasti eri verran kestäviä maksimivoiman indikaattoreita. Testipalojen (liite 2) leveydeksi asetettiin 10 mm, joka on sama kuin vastaraudassa normaalisti käytettävän teljen leveys, minkä johdosta testioven vapaaliike pysyy samana kuin oikeassa testaustilanteessa. Testipalan pituuden kannalta olennaista oli, että pala ei pääse luiskahtamaan vastaraudan telkipesästä pois, vaikka testipala vääntyisikin reilusti. Testipalan korkeutta h (liite 2) säätämällä saatiin testipalat kestäväksi erilaisia vääntövoimia. Käytettäviksi palojen korkeudeksi valittiin 23, 32, 39 ja 45 mm.



Kuvio 2. Testipalan korkeuden vaikutus tarvittavaan voimaan, jotta saavutetaan palan myötöraja.

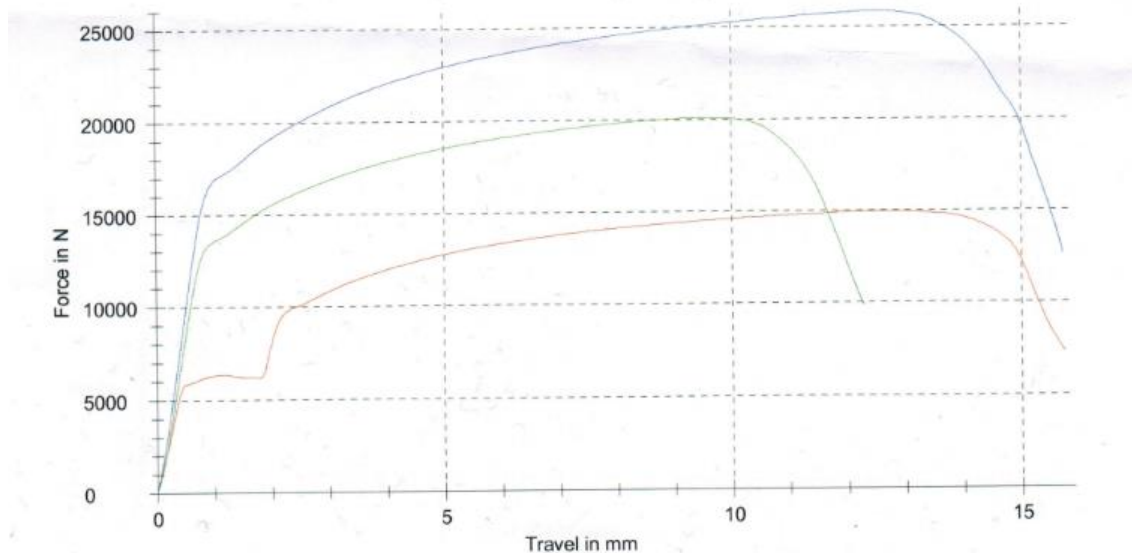
Testipalojen myötymisen laskennassa tarvittiin pinnaneliömomenttia. Materiaalin (S355) minimimyötöraja on 355 MPa, jonka mukaan laskenta on suoritettu (kuvio 2). Väännön momenttivartena käytettiin 28 mm, vaikka todellisessa testaustilanteessa tapahtuva momenttivarsi on 30–32 mm. Käytännössä 4 mm erotus momenttivarressa tarkoittaa hieman yli 10 % eroa tarvittavassa voimassa. Laskennassa käytettiin 28 mm momenttivarvta, koska testipaloja testatessa oli käytössä 28 mm tulkki. Testipalojen kestävyys varmistettiin Zwick-mittalaitteella ennen oikeaa murtotestissä tapahtuvaa maksimivoiman testiä (liite 3, kuva 1).

Yllättäen testipalat kestivät myötymistä paljon enemmän kuin teoreettinen laskenta antoi odottaa. Todellinen myötöraja oli noin 710–750 MPa, eli 100–115 % suurempi kuin laskennallinen. Murtorajakin oli noin 60–70 % korkeampi kuin valmistajan ilmoittama minimi.

Results table:

Legend	No.	Date	Specimen ID	Notes	ΔF N	ΔdL mm	F_{max} N	$dL(F_{max})$ mm
■	1	2.4.2019	23mm	Side load			14900	12,6
■	2	2.4.2019	32mm	Side load			20100	9,5
■	3	2.4.2019	39mm	Side load			25800	12,5

Curve graph:



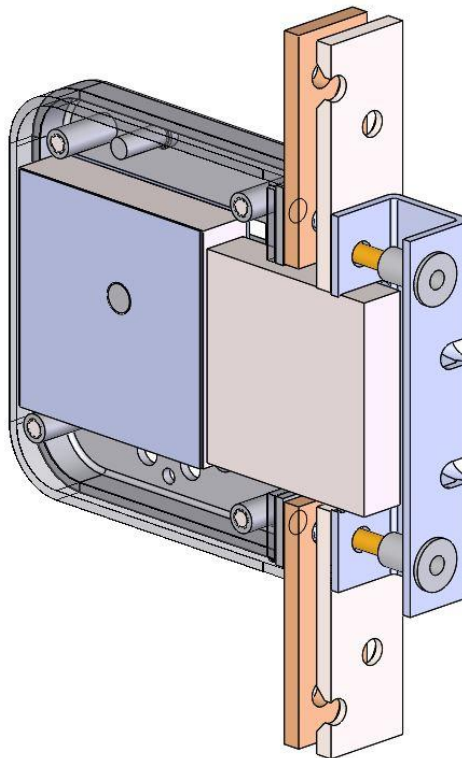
Kuvio 3. Toinen voimankestomittaus. Alimmassa käyrässä oleva lasku 6 kN kohdalla johtui testauskärjen välyksien poistumisesta.

Ensimmäisellä mittauskerralla mitattiin 32 mm ja 45 mm korkeat testipalat. Näiden mittauksien pohjalta arvioitiin loppujen palojen kestot, jotka mitattiin toisella mittauskerralla. Samalla varmistettiin myös testipalojen keston tasalaatuisuus mittaamalla toinen 32 mm testipala uudestaan. Arvioidut kestot pitivät hyvin paikkansa, joten tämän pohjalta voi myös olettaa oikeassa käytännön murtotestin aikana olevan 32 mm momenttivarren voimankeston laskennan avulla oikeaksi.

Kiinnityksen tukevuutta tarkasteltiin testauksen aikana heittokellolla kahdesta paikkaa. Ensimmäinen sijainti oli testipalan takapinnalta, josta mitattiin 32 mm korkea testipala (liite 3, kuva 2). Tässä esiintyi testauksen aikana vain 0,015 mm jousto ylöspäin. 39 mm korkean testipalan mittauksen aikana otettiin heiton tarkistus testipalan yläpuolella olevan kiinnitysraudan takareunasta. Tästä kohdasta mitattiin 0,02 mm jousto ylöspäin. Näin pienet heitot eivät vaikuta olennaisesti testausvoimaan, eli mittausta voidaan pitää luotettava.

4.2.2 Maksimivoiman määrittystesti

Maksimivoiman määrittystestiä varten jouduttiin hieman avartamaan valmista lukkorunkoa, jotta suurin testipala saataisiin mahtumaan sisään. Vastaraudan rakennetta vahvistettiin sekä materiaalin että rakenteen avulla.



Kuva 3. Maksimivoiman määrittäminen testilukkorungon CAD malli. Vastarauda ja rintalevy leikattu havainnollistamista varten.

Ensimmäisellä testauskerralla klossi halkesi kahtia väännön seurauksena. Suurin testipala (45 mm korkea) kesti vääntymättömänä, mutta vastaraudan levy ja rintalevy vääntyivät. Vastaavantyyppisen tuotteen murtotestauksessa molemmat osat kuitenkin pysyivät lähes taipumattomina. Maksimivoiman määrittämisestä puuttui sylinteripesät, jotka tukevat lukon pysymistä klossissa ja ehkäisevät samalla klossin halkeamista.

5 Abaqus-ohjelmiston perusteet

Abaquksessa ei valita käytettävää yksikköä vaan käyttäjä valitsee käyttämänsä yksikköryhmän taulukon 1 avulla. Simuloinnin tiedot määritetään valitulla yksikköryhmällä, jolloin tulokset saadaan ulos saman yksikköryhmän yksikköinä. Käytännössä tämä valinta täytyy tehdä jo malleja Abaqukseen tuodessa tai piirtäessä. Tässä työssä on käytetty SI (mm) -yksikköryhmää.

Taulukko 1. Abaquksessa käytettävät yksikköryhmät. Käyttäjä valitsee käyttämänsä yksikköryhmän [11].

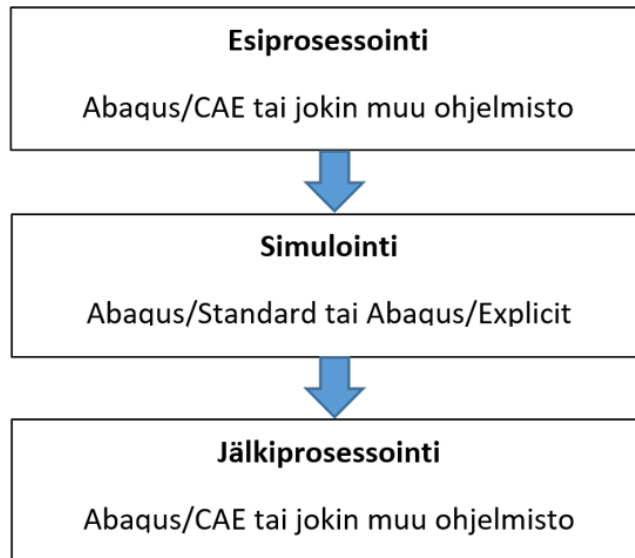
Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Abaqus-ohjelmistossa voi mallintaa osia lähes samalla tavalla kuin esim. Solidworks- tai Creo-ohjelmistolla, vaikkakin Abaquksessa kappaleiden piirtäminen ei ole yhtä sulavaa. Ohjelmisto kuitenkin sisältää yleisimmät mallintamiseen tarvittavat työkalut. Valmis osa kannattaa kuitenkin tehdä jollain varsinaisesti mallintamiseen tarkoitetulla työkalulla ja tuoda 3D-muotona Abaqukseen, esimerkiksi STEP-tiedostomuotona.

Jos kappaleen muoto on kuitenkin yksinkertainen, esim. palkki tai taso, voi muodon tehdä Abaquksessa kuorimallina (shell) tai palkkina (beam). Tällöin kappaleen laskenta on myös kevyempää ja nopeampaa.

Normaali Abaqus-analyysi koostuu yleensä kolmesta eri osa-alueesta: esiprosessointi, simulointi ja jälkiprosessointi. Esiprosessoinnissa määritetään fysikaalisen ongelman malli

ja luodaan Abaquksen *input*-tiedosto. *Input*-tiedosto voidaan luoda suoraan tekstieditorilla ilman 3D-mallia, mutta vähänkin monimutkaisempi tapaus on paljon helpompi ja nopeampi luoda 3D-mallin avulla Abaqus-ohjelmistolla tai jollain toisella esiprosessointiohjelmistolla. [11.]



Kuvio 4. Abaqus analyysin rakenne koostuu kolmesta vaiheesta. Mukailleen [11].

Abaquksen käyttöliittymässä vasemmalla on piirrepuun tapainen, josta löytyy kaikki Abaquksessa analyysiä varten tehdyt määrittymiset. Piirrepuun vieressä on pieni moduulivetovalikko, jonka jokainen osa-alue täytyy käydä läpi, jotta FEM-analyysi saa tarvittavat lähtötiedot. Nämä moduulin osa-alueet ovat lyhyesti:

Osa (part): Tuodaan tai luodaan jokainen analyysiin tarvittava osa. Myös tuodun osan muokkaaminen on mahdollista.

Ominaisuus (property): Määritetään jokaiselle osalle materiaalitiedot. Materiaaleja ei ole valmiina vaan materiaalin analyysin kannalta relevantit tiedot täytyy määrittää manuaalisesti.

Kokoonpano (assembly): Määritetään osien keskeinen kokoonpano analyysin lähtötilanteessa.

Vaihe (step): Määritetään analyysin vaiheenkesto ja parametrit, mitä analyysistä halutaan tuoda ulos.

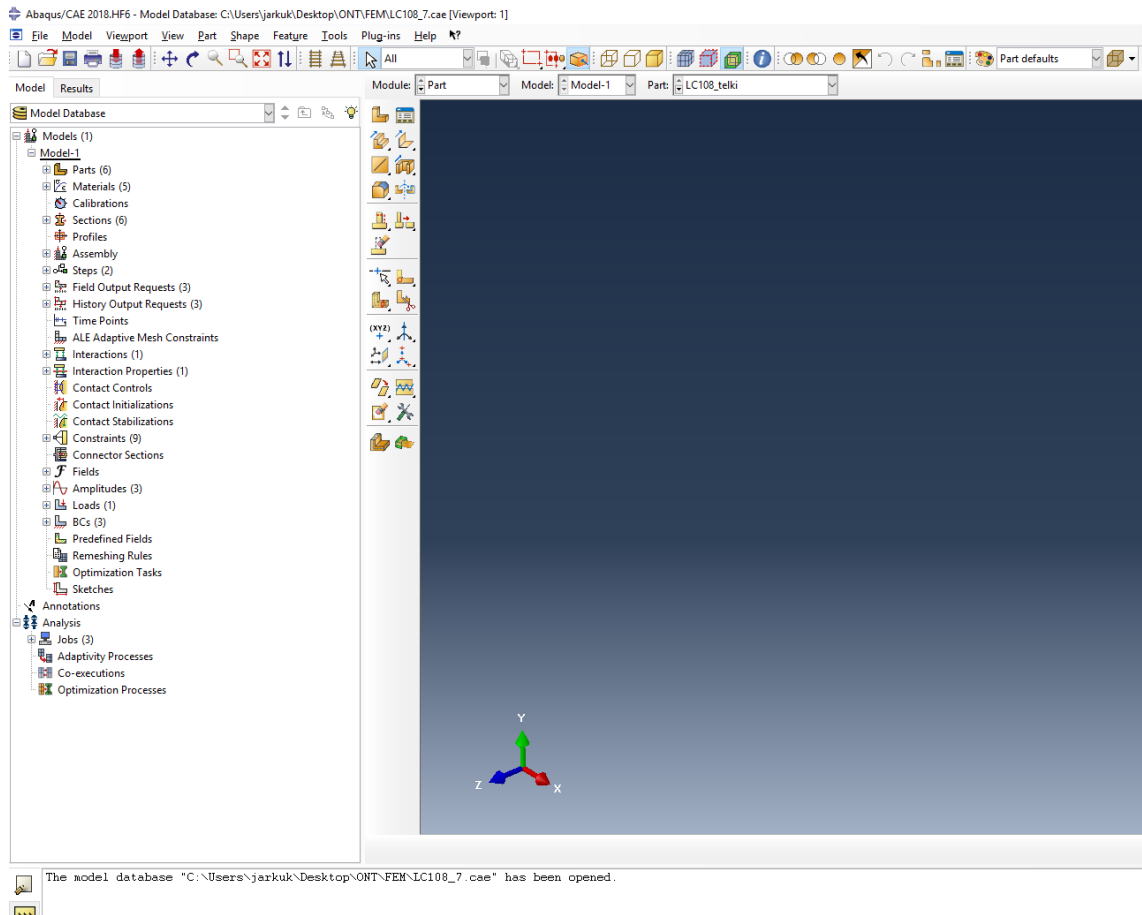
Vuorovaikutus (interaction): Määritetään osien keskinäinen vuorovaikutus; kitkat, pintojen törmäys ja osien vapausasteet toisiinsa tai pisteisiin nähden.

Kuormitus (load): Asetetaan analyysiin vaikuttavat voimat, kiinnityspisteet ja näiden vapausasteet.

Verkko (mesh): Luodaan tilavuusalkioiden verkko kappaleille ja pilkotaan kappaleet osioihin jotta verkotus paremmilla elementeillä olisi mahdollista.

Optimointi (optimization): Tällä moduulilla voi optimoida kappaleen osia tai rakenteita. Tätä osaa ei kuitenkaan tarvitse aina käyttää.

Työ (job): Tarkastetaan analyysin lähtötiedot ja määritetään laskennan tietoja, kuten prosessorin ytimien käyttö tai jos analyysi halutaan ajastaa. Toisin sanoen määritetään simuloinnin tekotapa.



Kuva 4. Murtotestauksen simuloinnin kokoonpano Abaqus-ohjelmistossa ja käyttöliittymä. Vasemmalla on piirrepuu, oikealla mallinäköymä ja näiden välissä valitun moduulin työkalut.

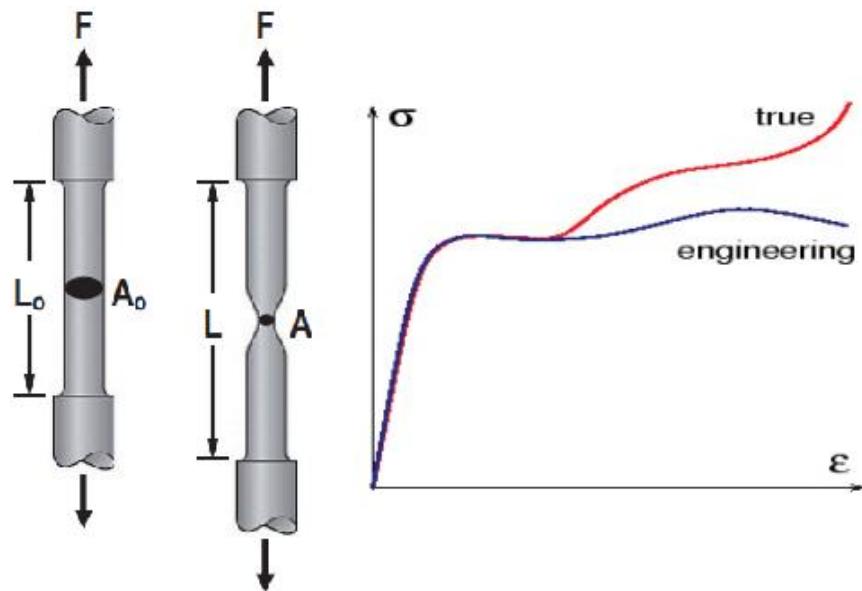
6 Lukkorungon murtotestauksen simulointi

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin murtotestauksen tilanteeseen, jossa ovea väännetään auki. FEM-simulointiin on tuotu Solidworksilla mallinnetut vastaraudan kokoonpano, lukkopesän rintalevy ja telki STEP-tiedostomuotoina. Lisäksi Abaquksessa on luotu kaksi levyä, jotka edustavat teljen tukipintoja pesästä ja kannesta. Vastarauta koostuu neliönmuotoisesta putkesta ja levystä, jotka on kiinnitetty toisiinsa kahdella ruuvilla ja niittimutterilla. Niittimutteri ja ruuvi on mallinnettu yhtenäiseksi laskennan helpottamiseksi. Teljen ulkomuodosta on poistettu pieniä pyöristyksiä ja laskennan kannalta epäoleennaisia

muotoja. Muotojen yksinkertaistamisen etuina on paremman verkotuksen mahdollistaminen, mikä lisää simuloinnin oikeellisuutta.

6.1 Materiaalien määrittäminen ja todellinen vetokäyrä

Osien tuomisen jälkeen täytyy osille määrittää materiaalit. Abaquksessa ei ole valmiina materiaalikirjastoa vaan materiaalien ominaisuudet täytyy määrittää itse. Määriteltävät ominaisuudet riippuvat simuloinnin tyypistä ja siitä, mitä simuloinnilla halutaan selvittää. Karkaistuille osille täytyisi luoda kerroksittainen rakenne, mikä jätettiin tässä työssä tekemättä ja korvattiin reilusti vahvemmalla aineella, koska simuloinnin tarkastelukohteena on vastarauta eikä telki. Oikeissa osissa telki on karkaistu ja vastarauta karkaisematon.



Kuva 5. Normaalisissa vetokokeissa materiaalin pinta-ala pienenee, mitä vetokoneet eivät osaa ottaa huomioon. Vetokokeen tulos tulee alemman käyrän mukaisena vaikka todellisuudessa kappaleen vetolujuus on punaisen käyrän mukainen. [12.]

Tässä simuloinnissa osille määritettävät ominaisuudet ovat tiheys, elastiset ja plastiset ominaisuudet. Elastiset ominaisuudet määritetään Youngin moduulilla ja Poissonin luvulla. Plastiset ominaisuudet määritetään materiaalin todellisella vetokäyrällä (true stress and true strain) avulla, mikä ottaa huomioon materiaalin pinta-alan pienenemisen perinteisen vetokokeen aikana.

Valmistajat ilmoittavat myös materiaalin murtovenymän (elongation), jota tarvitaan Abaquksessa materiaalin plastisten ominaisuuksien asettamiseen. Arvot täytyy syöttää hie- man valmistajien ilmoittamia arvoja pienempinä, koska Abaqus ei ota kuroutumista huo- mioon tässä simuloinnissa. Kuroutumista varten pitäisi määrittää plastisia ominaisuuksia lisää, mutta koska tässä työssä simuloidaan murtotestiä, tavoiteltava tilanne on, että kap- paleet kestäisivät testissä syntyvän maksimivoiman hajoamatta ja juurikaan muotoa muuttamatta. Valmistajien ilmoittama murtovenymä on yleensä kuroutumisen jälkeisen murtumisen venymäarvo.

Taulukko 2. Simuloinnissa käytetyt materiaalit ja niiden ominaisuudet.

S235		Domex S335		Laser 250		Ruuvit		Telki	
Jännitys	Venymä	Jännitys	Venymä	Jännitys	Venymä	Jännitys	Venymä	Jännitys	Venymä
235	0	355	0	240	0	800	0	800	0
360	0,13	450	0,18	360	0,18	1000	0,1	1800	0,06
361	1	451	1	361	1	1001	1	1801	1
Young	200000	Young	200000	Young	200000	Young	200000	Young	250000
Poisson	0,29	Poisson	0,29	Poisson	0,29	Poisson	0,2	Poisson	0,29

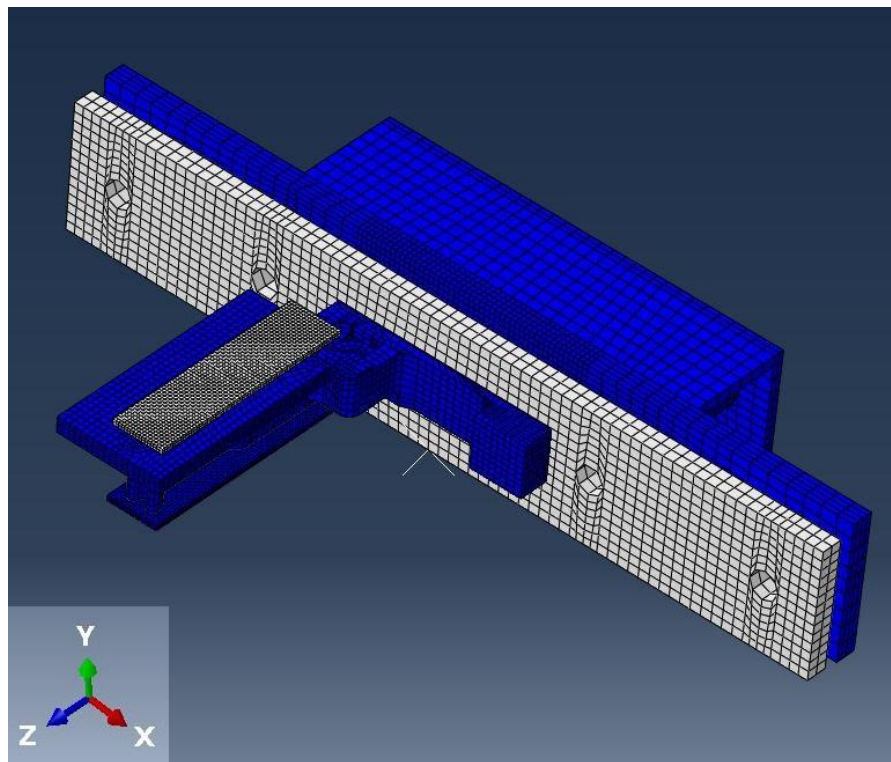
6.2 Simuloinnin vaiheen määrittäminen

Vaiheessa (step) määritetään simuloinnin kesto. Simuloinnin kokonaiskestoksi asetettiin 0,02 sekuntia ja näytteenottotaajuudeksi 0,0002 sekuntia. Tällöin simuloinnissa on kaik- kiaan 100 tilannetta, joissa simulointi näyttää valitut tulokset. Näyteyksikkö (increment) on Abaquksen automaattisesti arvioima, jotta CFL-tilan ehto täytyisi. Jokaisessa näy- teyksikössä Abaqus suorittaa laskennat.

6.3 Tuennat ja voima

Voima kohdistuu lukkorungon rintalevyn reunaan, koska ovea vääntäessä rintalevy ja telki liikkuvat oven mukana, kunnes vastarauta pysäyttää teljen liikkeen, teljen jäädessä puristuksiin rintalevyn ja vastaraudan väliin. Rintalevyn reunalle kohdistuva voima on simuloinnissa 10 kN, mikä on jopa hieman yliampuva. Luvussa 4.2.2 testattu maksimivoiman 32 mm korkea testipala, joka vastaa 10 kN maksimivoimaa, pysyi muuttumattomana. Tämä voima on muutettu paineeksi rintalevyn reunapinnalle, jotta rintalevyyn saadaan simuloitua tasaisesti jakautunut voima.

Simuloinnissa teljelle on määritetty vapausasteiden koordinaattikeskiöksi testiovesta mitatun saranan sijainti, jossa X-akseli on saranan akselin suuntainen ja Y-akseli oven normaalisuuntainen. Telki pääsee siirtymään Y- ja Z-suunnassa ja lisäksi kääntymään oman X-akselin ympäri. Koordinaattikeskiön piste kykenee pyörimään X-akselin ympäri muiden vapausasteiden ollessa lukittuina.



Kuva 6. Simuloinnin lähtöasetelma. Valkoinen iso levy on lukkorungon rintalevy, jonka kapealle alapinnalle voima kohdistuu. Pienempi valkoinen levy on lukkorungon kansi, joka estää teljen liiallisen liikkeen.

Rintalevy on tehty jäykäksi (rigid) kappaleeksi, eli rintalevyllä ei tapahdu mitään muodonmuutoksia. Aiemmin suoritetuissa fyysisissä testeissä rintalevy pysyi ehjänä ja koska simuloinnissa tarkastellaan vastaraudan kestävyttä, ei ole tarpeellista sallia rintalevyllä muodonmuutoksia. Rintalevy on lukittu kaikilta vapausasteiltaan samaan pisteeseen, joka on teljen vapausasteiden koordinaattikeskiö. Toisin sanoen sekä telki että rintalevy pyörittävät saman akselin ympäri, joka vastaa oven saranaa.

Lisäksi samaan kääntökeskiöön on liitetty lukkorungon kantta ja pesää vastaavat pienet levyt (kuva 6). Valkoinen levy on lukkorungon kansi ja teljen toisella puolella vastaavanlainen sininen levy on lukkorungon pesä. Näiden levyjen tarkoitus on rajoittaa teljen liikettä teljen osuessa vastarautaan. Levyjen etäisyys on vastaava kuin fyysisessä kappaleessa.

Vastarauta on kiinnitetty samoista paikoista, mistä vastarauta on fyysisessä testissäkin ruuvattu klossiin kiinni. Vastaraudalla on siis 6 kiinnityspintaa tai -pistettä. Kaikille kappaleille on myös luotu vaikuttamaan kitkakerroin, joka on 0,15.

6.4 Verkotus

Verkotusta varten osat täytyi pilkkoa sopivan muotoisiin alueisiin, jotta verkotuksesta saisi parempilaatuisen. Ilman pilkkomista oletusverkotus on vapaina tetroina. Kuution muotoinen verkotus (hex) antaa luotettavampia tuloksia. Kuutioverkotuksessa on vielä erilaisia vaihtoehtoja, miten verkotuksen luomat elementit sijoittuvat leikattuun alueeseen. Paras verkotustyyppi on tasainen kuutio (structured hex), mikä näkyy kuvassa vihreänä. Suorakulmaista verkkoa voi myös rakentaa pyyhkäisemällä (sweep), joka on osassa muodoista ainut vaihtoehto suorakulmaiselle verkotukselle. Tällöin Abaqus antaa verkotukselle hieman enemmän vapautta rakentua, mutta tämä mahdollistaa enemmän virheellisiä tuloksia.

7 Simuloinnin tulokset

Tuloksista osa sensuroitu.

Simulointeja tehtiin myös vertailumielessä erilaisilla voimilla ja vastaraudan levyn materiaaleilla. Isommilla voimilla sekä vastaraudan levyssä että telkipesässä tapahtuu suuria plastisia muodonmuutoksia. Jos fyysisessä testissä saataisiin suurempia voimia, voisi olettaa vastaraudan murtuvan, jos klossi kestää kuormitusta ehjänä. Maksimivoimaa määrittäessä kuitenkin klossi halkesi pienimmällä testipalalla (7 kN) mutta pysyi ehjänä isomilla testipaloilla (10 kN ja 14 kN), eli klossien kestävyudessa on myös vaihtelua.

8 Pohdinta

Opinnäytetyön lähtökohdat olivat mielenkiintoiset: Itselleni uusi ohjelmisto, Abaqus, jonka perusteet täytyy opetella ja aihe, josta ei ole juurikaan tietoa saatavilla. FEM-simuloinnista ja murtoturvallisuudesta oli kyllä tietoa ja kokemusta saatavilla mutta näiden kahden yhdistämisestä ei.

Alkuperäisessä toimeksiannossa ei ollut murtotestin maksimivoiman määrittystä vielä ajateltu, mutta tämä osoittautui simuloinnin kannalta varsin olennaiseksi asiaksi. Tästä tiedosta on myös paljon hyötyä Abloylle ja mahdollistaa yhdenlaisen murtotestin simuloimisen jopa kaikkien lukkorungon osien kannalta.

Hankalin asia lukkorungon murtotestin simuloimisessa, mikä tässä työssä jäikin tekemättä, on selvittää klossin todellinen vaikutus voiman jakautumiseen ja klossin joustaminen testin aikana. Simuloinnissa klossin voisi myös mallintaa ja asettaa vastaraudan tai lukkorungon mallinnettuun klossiin, mutta puun materiaalitietojen selvittäminen simulointia varten on haastavaa. Työtä voisi mahdollisesti jatkokehittää selvittämällä klossien

keston ja luomalla simuloitua klossia, johon simuloitava lukkorunko, tai sen osat, voisi asettaa. Haastavaa on myös vastaraudan kiinnitysruuvien huomioiminen. Ruuvit olisi kyllä helppo mallintaa simulointiin mukaan, mutta klossin vaikutus ruuveihin pitäisi saada mallinnettua. Todellisuudessa ruuvit ovat testin jälkeen aina hieman vääntyneet tai ruuvien kanta on katkennut.

Toisaalta simuloitavat klossit ja kiinnitysruuvit lisääisivät esiprosessoinnin työmäärää ja väärin tehtyinä voisivat lisätä virheellisten tulosten mahdollisuutta tukemalla tarkasteltavia osia liikaa. Klossi yksistään ei kuitenkaan kestä murtotestissä syntyviä voimia vaan tarvitsee kelvollisen vastaraudan tukemaan väännössä tapahtuvaa teljen iskua.

Itselleni yllättävin asia, mikä opinnäytetyötä tehdessä ilmeni, oli S335 teräksen myötörajan olevan niin paljon suurempi kuin ilmoitettu minimi. Tämän voisi varmistaa tekemällä standardinmukainen vetosauva samasta erästä, mistä testiteljet olivat, mutta en nähnyt sitä tarpeelliseksi. Uutta tuotetta suunniteltaessa täytyy kuitenkin suunnittelu toteuttaa valmistajan ilmoittaman minimiarvojen mukaisesti.

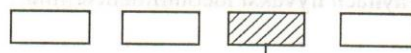
Mielestäni opinnäytetyön päälimäinen tavoite onnistui, eli selvitys siitä, onnistuisiko murtotestin tekeminen simuloinnin avulla. Vastaavanlaisia murtotestejä simuloimalla lisää syntyy kattavampi näkökulma todellisen testin ja simuloinnin välille, jolloin saadaan oikeasti testauskertoja vähennettyä ja tuotekehitysprojektin kokonaisaika pienennettyä. Maksimivoiman määrittämisen avulla myös lukkorungon sisäisten osien kestoa voidaan simuloida, kunhan vain osien pintarakente saadaan luotua oikeanlaiseksi simuloinnin ympäristöön.

Lähteet

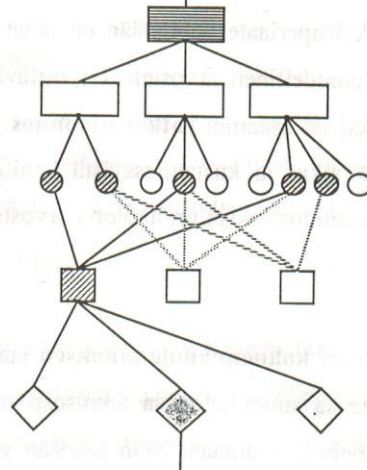
- [1] Abloyn sisäinen intra, 20.1.2019.
- [2] Abloyn nettisivut, 20.1.2019. <https://www.abloy.fi/fi/abloy/abloyfi/yritys/110-vuotiaan-abloyn-tarina/>
- [3] Laakko, Sukuvaara, Borgman, Simolin, Björkstrand, Konkola, Tuomi & Kaikkonen. 1998. Tuotteen 3D-CAD-suunnittelu. Helsinki: WSOY.
- [4] Jokinen, T. 1987. Tuotekehitys. Helsinki: Otatieto.
- [5] Henkilöhaastattelu, Pasi Kervinen, Tuotekehityspäällikkö, Abloy. 3.12.2018.
- [6] Hietikko ja Savonia-ammattikorkeakoulun kuntayhtymä. 2008. Tuotekehitystoiminta. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulun kuntayhtymä.
- [7] Tuhola E. ja Viitanen K. 2008. 3D mallintaminen suunnittelun apuvälineenä. Tampere, Tammertekniikka.
- [8] <https://www.simscale.com/blog/2019/01/implicit-vs-explicit-fem/> 9.2.2019.
- [9] <https://www.simscale.com/blog/2017/08/cfl-condition/> 9.2.2019
- [10] SFS 5970. Rakennushelat. Kiinteästi asennettavat lukot ja riippulukot. Murronestävyys. Vaatimukset ja testausmenetelmät. Vahvistettu 18.5.2015.
- [11] Abaqus käyttöohje, SIMULIA Use Assistance 2018. 26.1.2019.
- [12] https://web.adanabtu.edu.tr/Files/iyilmaz/Duyuru/dosya/ME%20207%20-%20Chapter%203_P3.pdf 10.3.2019

Tuotekehitysprojektin toimintavaiheet

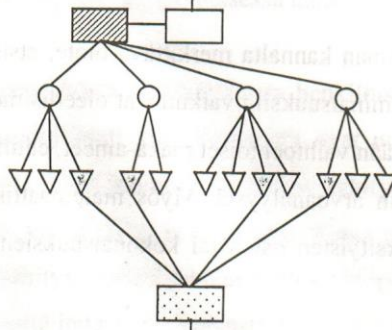
Tuotekehitysprojektin käynnistäminen



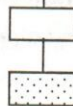
Luonnostelu



Kehittäminen



Viimeistely



Projektiehdotuksia

Valittu projekti-
ehdotus

Kehityspäätös

Kokonais-
toiminto

Osatoiminnot

Ratkaisumahdollis-
uuksia

Valitut ratkaisut

Kokonais toiminnon
ratkaisuperiaatteita

Valittu
ratkaisuperiaate

Ratkaisuluonnoksia

Valittu luonnos

Kokoonpanoluonnok-
sia mittakaavassa

Parannettu luonnos

Optimoitavat kohteet

Vaihtoehtoja opt.
kohteille

Optimoitu ratkaisu

Kehitetty konstruk-
tioehdotus

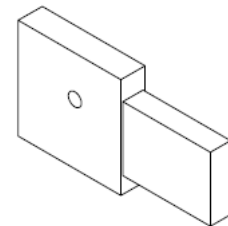
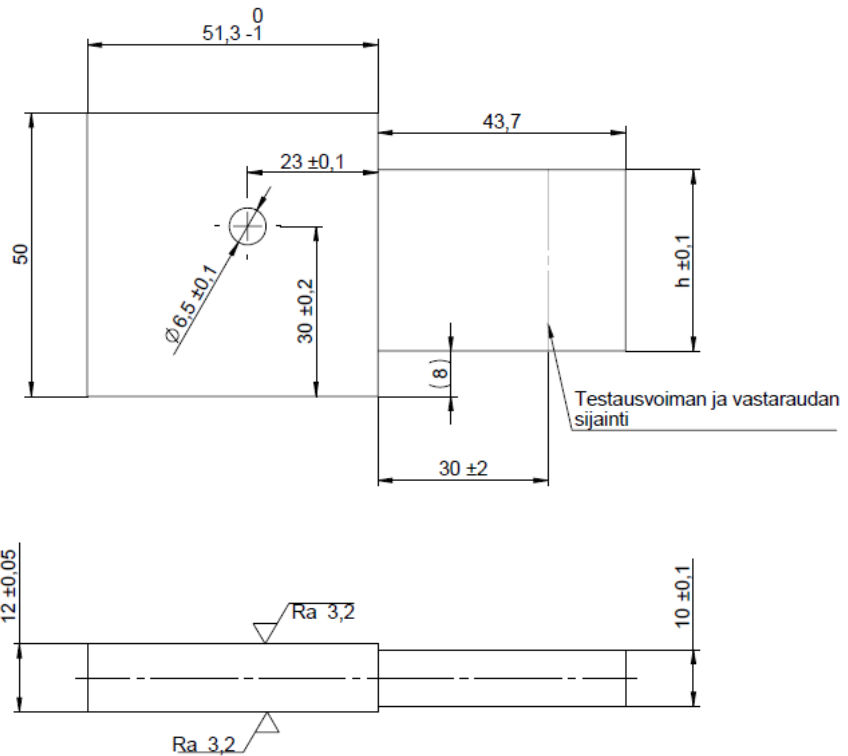
Yksityiskohtien muo-
toilu ja viimeistely

Valmistusohjeet
(piirustukset,
osaluettelot, jne.)
prototyyppi,
nollasarja

Tuotekehitysprojektin toimintavaiheet.

Testipalan mitoituspirstustus ja voiman sijainti

If not mentioned otherwise, dimensions do not include coating. This work is copyright and no part may be reproduced, by any process, nor may any other exclusive right be exercised without the permission of ASSA ABLOY.

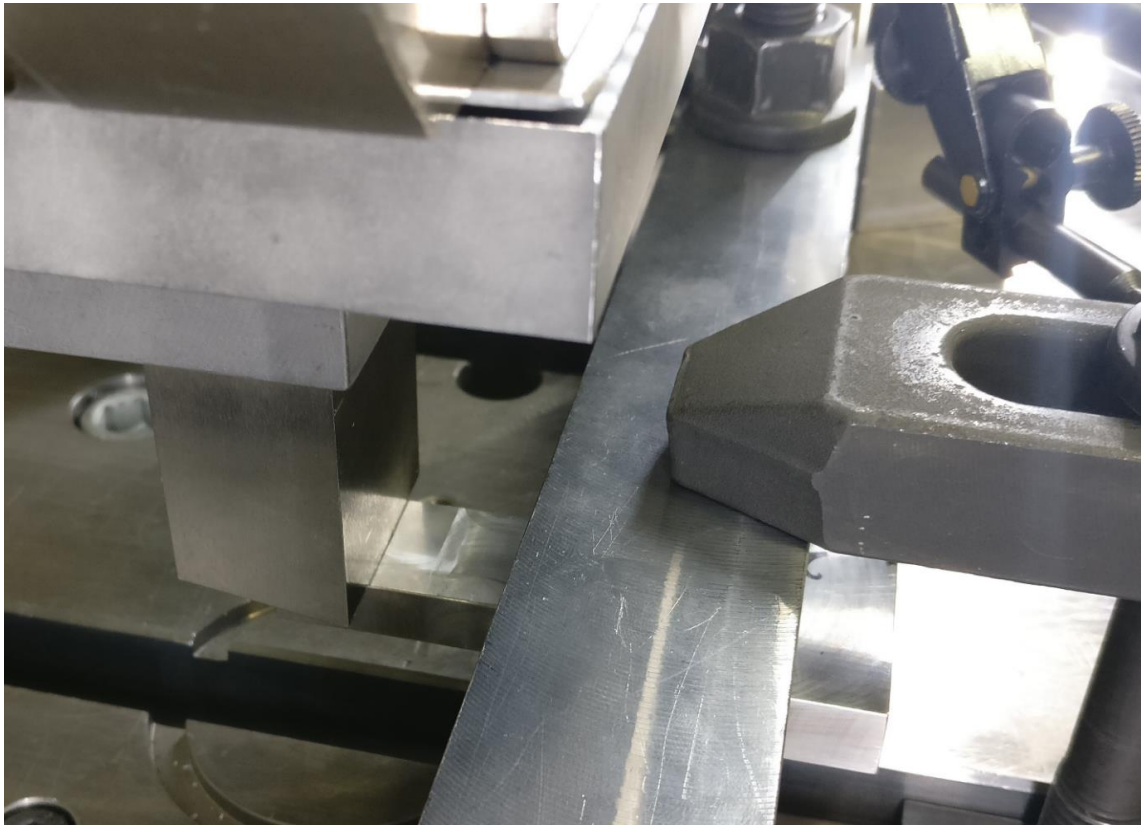


General tolerance ISO 2768-m	
Dimension	Tolerance
> 0,5 to 3	±0,1
> 3 to 6	±0,1
> 6 to 30	±0,2
> 30	±0,3

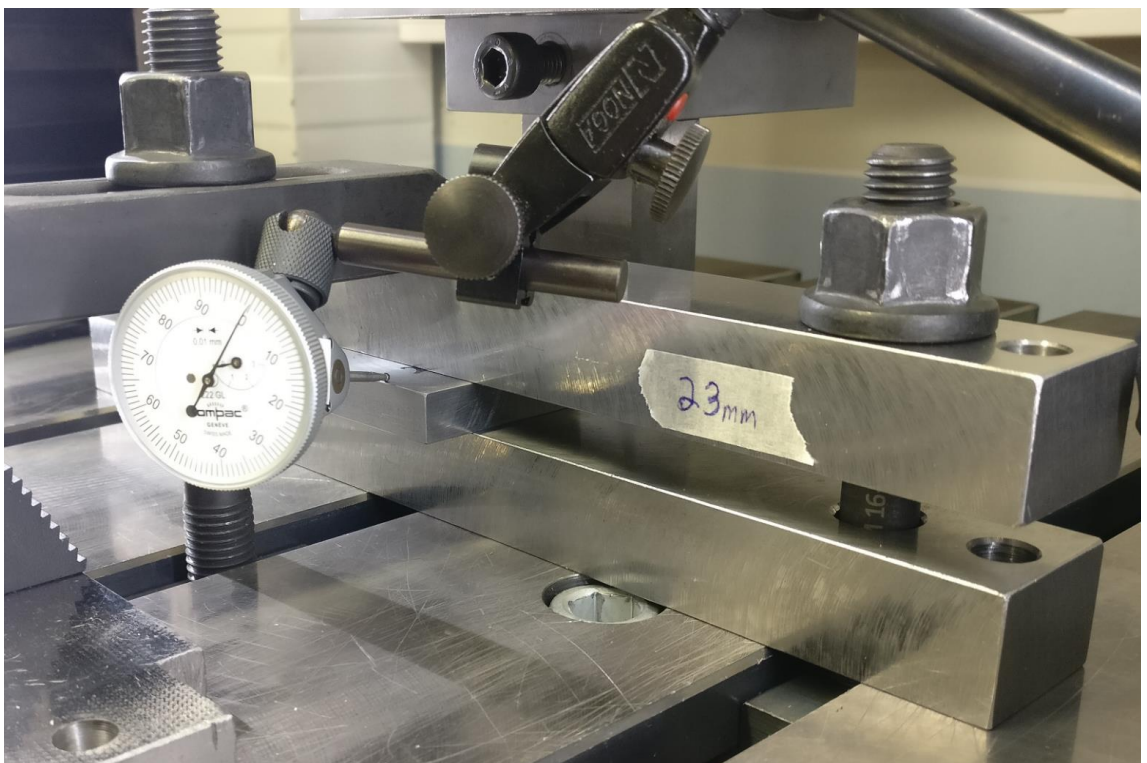
Surface treatment:			Material: EN 10025 - S355J0S			General tolerance: ISO 8015 ISO 2768-mH		
Volume: 44365.80 mm ³	Mass: 346.05 gram	Surface area: 11410.68 mm ²	Created (YYYY-MM-DD): 2019-03-14	Designed by: JarKuk	Drawn by: JarKuk	Scale: 1:1 (A4)	Projection: 	
ASSA ABLOY Abloy Oy			Test block			Alternate ID 6002407		
			Murtotestin maksimivoiman määrittys			Document ID D001040177-002		

Kuvia testipalojen voimankestomittauksesta

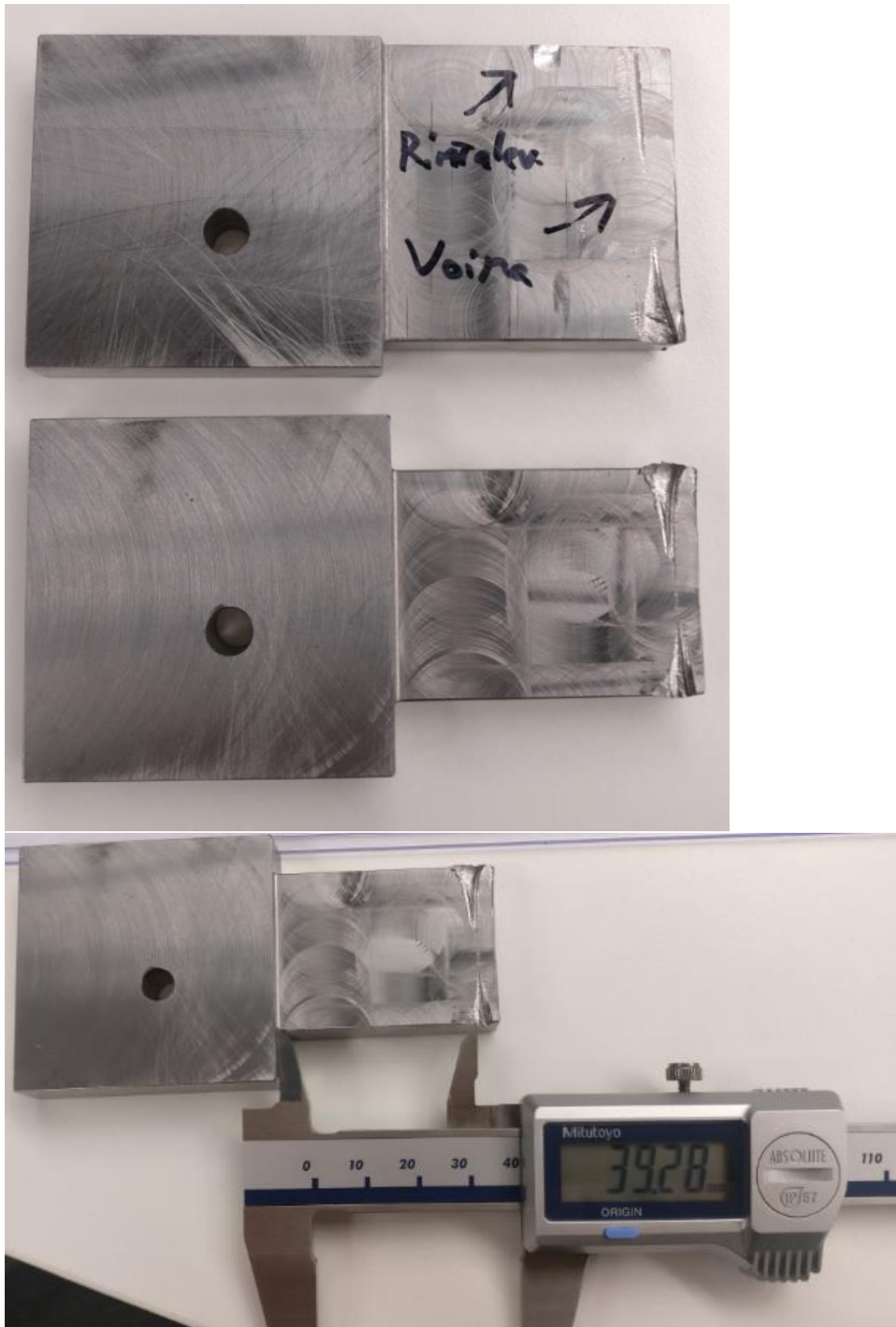
Kuva 1



Kuva 2



Testipalat 45 mm ja 32 mm käytännön murtokoetestin jälkeen. Rintalevyn osumakohta testin aikana noin 39 mm päässä kavennuksen juuresta.



23 mm testipalan vääntyminen

