

Henri Hakulinen

Vauriontunnistus ja vasteiden estimointi värähtelymittausten ja simulointimallin avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinööryö

19.5.2017

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Henri Hakulinen Vaurion tunnistus ja vasteiden estimointi värähtelymittausten ja simulointimallin avulla 66 sivua + 5 liitettä 19.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Konetekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Tämä insinööri työ on kaksiosainen. Ensimmäisen osan tavoitteena oli luoda vaurion mallinnuksella simuloitua mittaustietoa rakenteiden kunnonvalvontaan liittyvää vaurion tunnistusta varten. Rakenteeseen syntyvä vaurio mallinnettiin avoimena särönä. Toisessa osassa tavoitteena oli värähtelymittausten ja FEM-mallin yhdistäminen vasteiden estimointia varten kaikkialla fyysisessä rakenteessa. Yhdistämistä varten tutkittavasta rakenteesta mallinnettiin kaksi FEM-mallia, joista toinen toimii fyysisen rakenteen korvikkeena ja toinen mallinnusvirhettä sisältävänä simulointimallina. Simuloinnit ja laskut suoritettiin Abaqus CAE -ohjelmistolla. Tutkittavana rakenteena toimi suorakulmaisesta teräsputkesta valmistettu kolmiosainen teräsrakenne.</p> <p>Rakenteella simuloitavat vauriot ovat suuruudeltaan 12,5 %, 25 %, 37,5 % 50 % rakenteen profiilin poikkileikkauksen pinta-alasta. Vaurio sijaistee rakenteen kiinnityskohdassa pystyputken työssä.</p> <p>FEM-mallin ominaismuotojen avulla ratkaistiin optimaaliset anturisijainnit fyysisessä rakenteessa. Tämän lisäksi fyysiselle rakenteelle tehtiin värähtelyanalyysi, josta saatiin mittaustietoa vaurion tunnistusta sekä <i>Virtual Sensing</i> -tekniikalla ratkaistavaa <i>full-field</i>-tietoa varten. Vaurion tunnistuksessa käytettävälle mittaustiedolle tehtiin kohinanpoisto kahdella eri menetelmällä. Kohinanpoistolla pyritään tarkempaan vaurion tunnistukseen.</p> <p>Kiihtyvyyksiin perustuva vaurion tunnistus toimi erittäin hyvin, mutta venymiin perustuvalla vaurion tunnistuksella saadut tulokset olivat antureiden asetteluun vuoksi harhaan johtavia. Tämä johtui antureiden asettelusta suoraan särön kohdalle, mikä ei todellisuudessa ole mahdollista. Kiihtyvyyksien avulla rakenteessa havaittiin Bayes-menetelmällä suodatetusta datasta jopa 25 % vaurio.</p> <p>Värähtelymittausten ja FEM-mallin yhdistäminen onnistui. Rakenteiden ominaismuotovertailussa havaittiin, että ominaismuodot vastaavat toisiaan riittävällä tarkkuudella. Lopulliset tulokset saavutettiin antureiden optimaalisten sijaintien uudelleen määrittelyllä. Tuloksina saatiin riittävän tarkkaa <i>full-field</i>-tietoa, joka tarkastettiin fyysisen rakenteen anturiverkkojen vertailulla.</p>	
Avainsanat	Virtual Sensing, full-field response, värähtelymittaus, rakenteiden kunnonvalvonta, vaurion tunnistus, Abaqus, simulointimalli

Author Title	Henri Hakulinen Damage Detection and Response Estimation with Vibration Measurements and Simulation Model
Number of Pages Date	66 pages + 5 appendices 19 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructor	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>This Bachelor's thesis had two objectives. The first objective was to create simulated sensor data from damaged and undamaged structures for damage detection. The simulated damage type was a fatigue crack that was modelled as an open crack. The second objective was to combine vibration measurements and the FEM model for response estimation throughout the structure. Two FEM models were required for this process. One to be used as the physical structure and the other as a simulation model containing modelling errors. The simulations and calculations were carried out using Abaqus CAE software. The studied structure was a steel structure made of three parts with a rectangular cross section.</p> <p>The simulated damage sizes were 12.5%, 25%, 37.5% and 50% of the cross-sectional area of the structure's profile. The damage was located at the base of the vertical pipe at the point of attachment.</p> <p>Firstly, optimal sensor placements for the physical structure were calculated using EFI algorithms. These sensors were used during the first vibration measurements. The measurement data was used for damage detection and for <i>full-field response</i> estimation. Two different <i>noise reduction</i> were applied for the measurement data that was used in damage detection. The purpose of noise reduction in this thesis was to test if it makes the damage detection more accurate. The measured quantities were accelerations and strains.</p> <p>It was discovered that damage detection based on acceleration measurements worked successfully, but the results obtained with strain measurements were too optimistic and misleading. This was due to sensor placement that is not possible to implement in a real physical structure. The best result in damage detection was a 25% crack. It was detected with Bayesian noise reduced acceleration data.</p> <p>In conclusion, the combination of vibration measurements and the FEM model was carried out successfully. With <i>MAC</i> eigenmode comparison it was found out that the eigenmodes of both models correspond to each other with a sufficient precision. After the eigenmode comparison, new vibration measurements were made. Finally, new optimal sensor placements were calculated using different algorithms and the final vibration measurements were taken. As a result, sufficiently accurate <i>full-field response</i> data was obtained. The accuracy of the data was tested by comparing data obtained from the two different sensor networks.</p>	
Keywords	Virtual Sensing, full-field response, vibration measurement, structural health monitoring, damage detection, Abaqus

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Rakenteiden värähtely ja kunnonvalvonta	3
2.1	Yleistä värähtelystä	3
2.2	Värähtelyn käsitteitä	4
2.2.1	Vaimennettu värähtely	5
2.2.2	Ominaistaajuudet ja ominaisarvotehtävä	6
2.3	Yleistä kunnonvalvonnasta	7
2.3.1	Rakenteiden kunnonvalvonnan menetelmät	8
2.3.2	Vaurion määrittely	9
2.3.3	Vaurion tunnistus	10
2.4	Virtual Sensing	11
3	FEM-simulointi	12
3.1	Palkki- ja kuorimalli	12
3.2	Linear Dynamics	14
3.2.1	Ominaismuodot yleisesti	15
3.2.2	Ominaismuotojen superponointi	17
3.2.3	Vaimennus	21
4	Analysoitava rakenne	21
4.1	Rakenteen ideointi	21
4.1.1	Rakenteen mitoitus ja mallintaminen	21
4.1.2	Profiilin valinta	25
4.1.3	Kuorimallin validointi	27
4.2	Ominaistaajuudet ja -muodot	28
4.2.1	Ominaistaajuuksien ja -muotojen vertailu	29
4.2.2	MAC-ominaismuotovertailu	34
4.3	Vasteiden estimointi	36
5	FEM-mallien suunnittelu ja rakenteen simulointi	37
5.1	Elementtityypit ja elementtiverkot	37
5.2	Antureiden asettelu ja mitattavat suureet	40
5.3	Vaurion mallintaminen	44

5.4	Värähtelyanalyysi	46
5.4.1	Aikainkrementti	46
5.4.2	Transienttivaihe	47
5.4.3	Vaikuttavat voimat	48
5.5	Laskennan suorittaminen	50
5.5.1	Laskennan rajoitukset	51
5.5.2	Abaqus Command	53
6	Tulokset	54
6.1	Vauriontunnistus	54
6.2	Virtual sensing	58
6.3	Mallinnuksessa havaitut virheet	61
6.3.1	Venymät	61
6.3.2	Mitoitusvirhe	61
7	Yhteenveto	63
	Lähteet	65

Liitteet

Liite 1. Satunnaisgeneroitu heräte

Liite 2. Venymäantureiden sijainnit ja vapausasteiden priorisointi vauriontunnistuksessa

Liite 3 Kiihtyvyyssantureiden sijainti ja vapausasteiden priorisointi vauriontunnistuksessa

Liite 4 Kiihtyvyyssantureiden asettelu kuorimallissa vauriontunnistusta varten

Liite 5 Venymäantureiden asettelu kuorimallissa vauriontunnistusta varten

1 Johdanto

Infrastruktuurin ikääntyminen on suuri huolenaihe niin ekonomisista kuin turvallisuussyistäkin. Ikääntyvien rakenteiden elinajan pidentämiseksi tai uusien älykkäiden rakenteiden suunnittelun toteuttamiseksi voidaan hyödyntää rakenteiden kunnonvalvontaa (*Structural Health Monitoring, SHM*). Sen avulla voidaan estimoida rakenteen kuntoa ja saada varhainen varoitus rakenteeseen muodostuvasta vauriosta. [1, s. 777.]

Keskeinen ongelma suurilla rakenteilla operoitaessa on sensorien asettaminen optimaalisille sijainneille. Paino- ja kustannussyistä on käytettävä minimimäärää sensoreita, jotka asetetaan optimaalisille sijainneille. Anturit pitää sijoittaa niin, että niillä pystytään täyttämään systeemin vaatimukset tunnistuksen, tilan estimoimisen ja optimaalisen ohjauksen suhteen. [2, s. 251.]

Rakenteen dynaaminen *full-field*-vaste on mahdollista estimoida rakenteeseen asettamalla rajallisella määrällä sensoreita. *Virtual Sensing*-tekniikat estimoivat mittaamattomia suureita käytettävissä olevien fyysisten sensoreiden avulla. [10, s. 1.]

Tämän insinööri työ on kaksivaiheinen. Ensimmäisen vaiheen tavoitteena on luoda vaurion mallinnuksella kohinaista värähtelymittausdataa. Fyysisestä rakenteesta saatavan mittausdatan avulla testataan rakenteiden kunnonvalvontaan liittyvää vaurion tunnistusta sekä kohinanpoiston vaikutusta vaurion tunnistuksessa. Työssä simuloidaan ehjää sekä vaurioitunutta rakennetta, kun rakenteeseen vaikuttaa samanaikaisesti kolme satunnaisherätettä. Vaurion tyyppinä on hitsiliitoksen väsymissärö, jota käsitellään avoimena särönä. Rakenteeseen muodostuva vaurio sijaitsee rakenteen kiinnityskohdassa, pystypalkin tyvässä. Tulosten realisoimiseksi simuloituun mittausdataan lisätään kohinaa tasaisesti, jotta kaikilla sensoreilla on saman suuruinen mittausvirhe.

Toisessa vaiheessa tavoitteena on värähtelymittausten ja simulointimallin yhdistäminen. Yhdistämisen tavoitteena on mahdollistaa vasteiden estimoiminen kaikkialla tutkittavassa rakenteessa. Tutkittavasta rakenteesta tehdään kaksi erilaista FEM-mallia. Toinen vastaa tutkittavana olevaa fyysistä rakennetta, joka mallinnetaan kuorielementeillä, ja toinen fyysistä rakennetta vastaavaa simulointimallia, joka mallinnetaan palkkielementeillä.

Tutkittava rakenne on kummassakin työn vaiheessa sama, kolmesta palkista valmistettava teräsrakenne, joka valmistetaan suorakulmaisesta teräsputkesta. Simuloinnit ja FEM-mallien luonti suoritetaan Abaqus CAE -ohjelmistolla sekä Abaqus/Standard ratkaisijalla.

Insinööriyön teoriaosassa käsitellään värähtelymekaniikkaan liittyviä käsitteitä, rakenteiden kunnonvalvontaan ja vaurion tunnistukseen liittyviä asioita, ominaismuotojen superponoinnin teoriaa sekä käydään läpi tehtävään FEM-mallinnukseen liittyvää teoriaa, jolla on vaikutusta työssä tehtäviin simulointeihin.

Työn soveltavassa osassa käsitellään tutkittavan rakenteen mitoitusta sekä mallinnusta Abaqus CAE:lla. Mallinnuksessa käsitellään tarkemmin profiilin valintaa, antureiden asettelua, vaikuttavia voimia sekä vaurion mallinnusta. Työn lopussa käydään läpi suoritettut simuloinnit käytännön tasolla ja tarkastellaan simuloinneista saatuja tuloksia ja niille tehtyjä analyyseja.

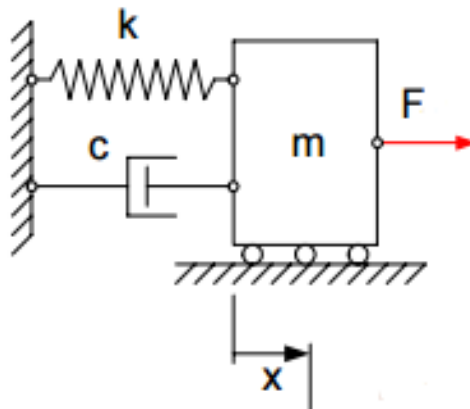
2 Rakenteiden värähtely ja kunnonvalvonta

2.1 Yleistä värähtelystä

Värähtelyllä tarkoitetaan fyysikaalisen systeemin liikettä tasapainoaseman ympärillä. Yleisimpiä mekaanisia fyysikaalisia systeemejä ovat rakenteet, koneet ja koneenosat. Lähtökohtaisesti kaikki värähtely rakenteissa ja koneissa on haitallista. Värähtely aiheuttaa muun muassa rakenteissa jännityksiä ja kestoajan lyhenemistä, koneissa käynnin epävarmuutta, prosessikoneiden tuottaman laadun heikkenemistä sekä koneista ja rakenteista ympäristöön kohdistuvaa meluhaittaa. Värähtelyä on myös mahdollista hyödyntää. Tärinäkuljetin, seulat, tiivistimet sekä väsytykoneet ovat muutamia esimerkkejä, joissa värähtelyä käytetään hyödyksi koneen suorittamassa prosessissa. [3, s.11 - 12.] Tässä insinöörityössä tehtävässä tutkimuksessa rakenteen värähtelyä hyödynnetään vaurion-tunnistuksessa.

Rakenteiden dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä merkittävimpiä ovat massan ja jäykkyyden suuruus sekä jakautuminen.

Yksinkertaisimmillaan värähtelijänä voi toimia kuvan 1 mukainen yksittäinen kappale, joka on kiinnitetty jouseen. Kuvan 1 värähtelijään on lisätty heräte F sekä vaimennin, jonka vaimennuskerroin on c . Kyseisellä värähtelijällä on yksi vapausaste, eli kappale pääsee liikkumaan vain x -suunnassa. Yleisessä tapauksessa jäykällä kappaleella on kuusi vapausastetta, kolme siirtymää (*translaatiota*) ja kolme kiertymää (*rotaatiota*). Mitä enemmän systeemissä on kappaleita, sitä enemmän sillä on vapausasteita.



Kuva 1 Yhden vapausasteen värähtelevä mekaaninen systeemi [14]

2.2 Värähtelyn käsitteitä

Vapausasteiden (*Degrees of Freedom, D.O.F*) lukumäärä mekaanisessa systeemissä on yhtä suuri kuin niiden itsenäisten koordinaattien minimimäärä, jotka vaaditaan systeemin eri osien asemien määrittämiseen millä tahansa ajan hetkellä. Yleisesti vapausasteiden lukumäärä on siis yhtä suuri kuin kaikkien mahdollisten itsenäisten siirtymien lukumäärä. [4, 1.18.]

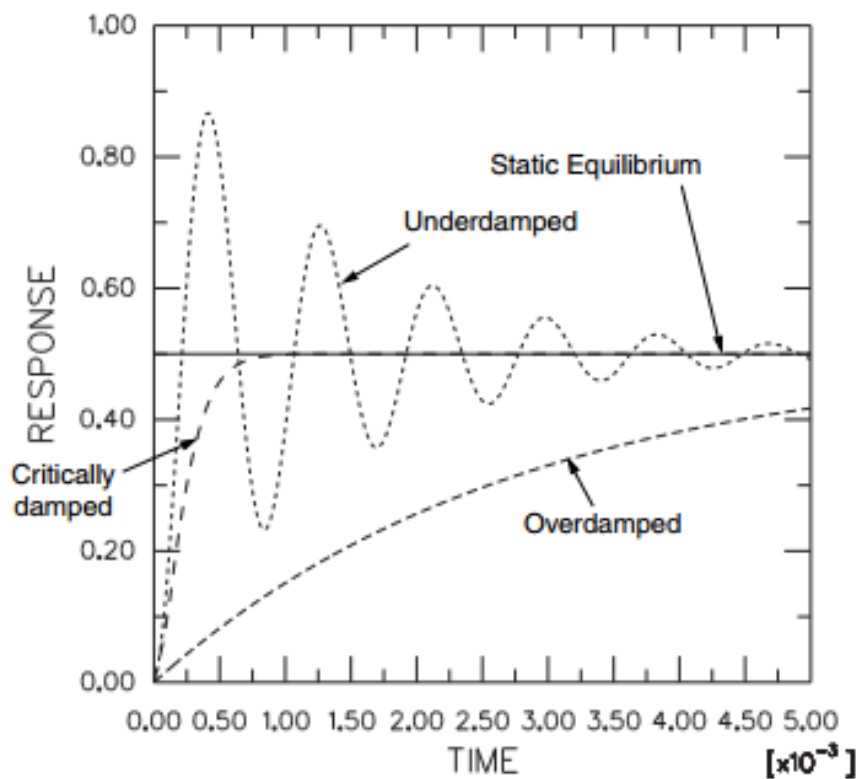
Vaimennus (*Damping*) poistaa systeemistä energiaa, minkä takia värähtelyt vaimenevat, ellei systeemiin ulkopuolelta tuoda lisäenergiaa värähtelyyn. Yleisesti vaimennusvoiman suuruus voidaan olettaa suoraan verrannolliseksi värähtelyn nopeuteen. Nopeuteen verrannollisia vaimennuksia kutsutaan viskoosivaimennuksiksi. Vaimennus tapahtuu tällöin väliaineen, esimerkiksi nesteen tai kaasun kitkan avulla. Vaimennus voi myös johtua aineen sisäisestä kitkasta. Viskoosivaimennus ζ on tämän työn kannalta olennainen vaimennustyyppi. [3, s. 18.]

Heräte on systeemiin vaikuttava ajan mukana muuttuva voima tai johonkin osaan vaikuttava pakkosiirtymä. Heräte voi olla harmoninen, jaksollinen tai jaksoton. **Jaksollisia herätteitä** syntyy koneissa pyörivien akseleiden ja pyörien massaepäkeskisyydestä, edestakaisesta liikkeestä, hihnoista, kiskoista tai muusta vastaavasta. Jaksollista herätettä voi myös aiheuttaa väliaineen virtaus. Väliaineen virratessa kappaleen ohi voi se aiheuttaa jättöpuolelle niin sanotun *von Karmanin* pyörreradan, joka aiheuttaa virtausta vastaan kohtisuorassa tasossa vaikuttavan herätevoiman. Tämä tyyppistä herätettä voi esiintyä esimerkiksi savupiipuissa, mastoissa ja lentokoneiden ulokeantenneissa. **Jaksottomat herätteet** eli satunnaisherätteet ovat tämän työn kannalta olennaisia. Niitä ovat esimerkiksi tuulen, aallokon ja liikenteen maaperään aiheuttamat ajan suhteen pitkäaikaiset satunnaisesti muuttuvat herätevoimat. Käytännössä satunnaisherätettä syntyy esimerkiksi maakulkuneuvon liikkua epätasaisella alustalla, lentokoneen lentäessä turbulenttisessa ilmassa tai laivan liikkua aallokossa. Myös maanjäristykset voidaan lukea kuuluviksi tähän ryhmään. **Iskumaiset ilmiöt eli impulssiherätteet** synnyttävät suhteellisen lyhytaikaisia värähtelyjä. Iskumaisia ilmiöitä syntyy, kun tietyn liikemäärän omaava massa törmää rakenteeseen tai vastaavasti liikkeessä oleva rakenne törmää esteeseen. Rakenteessa itsessään voi olla varastoitunutta kimmoenergiaa, joka vapautuu äkillisesti esimerkiksi kehärakenteen sauvan katketessa. Samoin kimmoenergiaa voi vapautua, jos rakenteen jokin kohta on pakotettuna tiettyyn siirtymätilaan ja tämä kohta vapautetaan äkillisesti. [3, s. 18 – 19.]

2.2.1 Vaimennettu värähtely

Vaimennetussa värähtelyssä systeemiin vaikuttaa liikettä vastustavia voimia, vaimennusvoimia. Vaimennusvoiman tekemä työ muuttuu esimerkiksi lämmöksi ja poistuu emission kautta rakenteesta pois. Tätä systeemistä poistuvaa energiaa kutsutaan dissipatioenergiaksi. Vaimennettu systeemi ei siis ole konservatiivinen eli energiaa säilyttävä. ”Negatiivinen” vaimennus on myös mahdollista, eli vaimennuksen kautta systeemiin tulee lisää energiaa. Tällöin liikkeen amplitudi pyrkii jatkuvasti kasvamaan. [3, s. 62.]

Vaimennustyyppejä on kolme erilaista; alikriittinen, kriittinen ja ylikriittinen vaimennus. Vaimennustyyppien vaikutusta rakenteeseen on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2 Vaimennustyyppit [8]

Sisäisen vaimennuksen tapauksessa dissipatioenergian suuruus on verrannollinen jännitysamplitudin, eli lineaarisissa tapauksissa siirtymäamplitudin neliöön. [3, s. 70.]

2.2.2 Ominaistaajuudet ja ominaisarvotehtävä

Ominaistaajuus tarkoittaa lyhyesti sitä, että kun vapaa kappale tai systeemi alkaa värähdellä, tapahtuu värähtely kappaleen tai systeemin ominaistaajuudella. Kun systeemiin vaikuttaa ulkoinen jaksollinen heräte jollakin systeemin ominaistaajuudella, alkaa kappale värähdellä ja värähtelyn amplitudi kasvaa. Systeemin ominaistaajuuteen vaikuttaa systeemin jousivakio (k) ja massa (m). Yhden vapausasteen systeemin ominaistaajuus voidaan ratkaista kaavalla (1).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Ominaisarvotehtävä

Tarkastellaan vapaan vaimentamattoman värähtelyn tilannetta. Vapaan vaimentamattoman värähtelyn tilanteessa liikeyhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

jossa $[m]$ on massamatriisi ja $[k]$ jäykkyyismatriisi. Yhtälöt ovat homogeenisia, joten jos $x_i(t)$:t ovat ratkaisuja, niin ovat myös $\alpha x_i(t)$:t ratkaisuja, joissa α on mielivaltainen vakio.

Tarkastellaan massojen synkronista värähtelyä. Tällöin $x_i(t)$:n aikariippuvuus on sama ja eri pisteiden siirtymien osamäärä $\frac{x_i}{x_j}$ on ajasta riippumaton. Synkronisuusvaatimuksesta johtuen aikariippuvuus on harmoninen, tällöin ratkaisu on muotoa

$$\{x(t)\} = \{X\}\cos(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

jossa $\{X\}$ on värähtelyn amplitudivektori ja ω värähtelyn kulmanopeus. Kun tämä ratkaisu sijoitetaan liikeyhtälöön, saadaan se muotoon

$$-\omega^2[m]\{X\}\cos(\omega t - \varphi) + [k]\{X\}\cos(\omega t - \varphi) = \{0\} \quad (4)$$

Koska yleisesti $\cos(\omega t - \varphi) \neq 0$, niin kaava saadaan muotoon

$$[k]\{X\} = \omega^2[m]\{X\} \quad (5)$$

Kyseessä on ominaisarvotehtävä. Ominaisarvot eli ominaiskulmanopeudet ovat karakteristisen determinantin

$$|[k] - \omega^2[m]| = 0 \quad (6)$$

juuria. Sijoittamalla ratkaistut juuret ω_i vuorotellen yhtälöön

$$[k]\{\phi\}_i = \omega_i^2[m]\{\phi\}_i \quad (7)$$

voidaan tästä yhtälöryhmästä ratkaista ominaisvektorit $\{\phi\}_i$, joita kutsutaan ominaismuodoiksi tai värähtelymuodoiksi. Niiden komponentteina ovat amplitudien suhteet kussakin värähtelymuodossa. Värähtelyn muoto on tällöin selvä kaikilla ominaistajuuksilla. Ratkaisu voidaan nyt esittää muodossa

$$[k][\Phi] = [m][\Phi][\omega_i^2] \quad (8)$$

missä $[\Phi]$ on ominaismuotomatriisi, jossa pystyrivinä ovat ominaisvektorit $\{\phi\}_i$ ja $[\omega_i^2]$ matriisi, jonka lävistäjällä on ominaiskulmanopeuksien neliöt. Dynaamisen analyysin aikaa vievin osa on juuri ominaisarvotehtävän ominaisarvojen löytäminen. [3, s.131-132]

2.3 Yleistä kunnonvalvonnasta

Rakenteet ja systeemit suunnitellaan käyttökohteena olevan ympäristön aiheuttamien vaatimusten mukaan. Suunnitteluvaiheessa rakenteeseen vaikuttavia voimia arvioidaan ja materiaalit valitaan niiden ominaisuuksien perusteella. Monesti rakenteista valmistetaan myös prototyypit, joita testataan. Mallinnus- ja suunnitteluohjelmistojen käyttö on myös yleistynyt paljon. Niiden avulla yritetään saada mahdollisimman paljon tietoa rakenteen käyttäytymisestä ja ominaisuuksista käyttöympäristössä. Todellisuus on kuitenkin se, että rakenteen todellisen käyttäytymisen saa selville vasta sitten, kun se on otettu käyttöön todellisessa ympäristössä. Tästä johtuen kyseessä oleviin ja yleisesti käytössä oleviin suunnittelutapoihin kuuluu paljon oletuksia ja arvioita. Tämä johtaa monesti yli-suunnitteluun ja liian suurien varmuuskertoimien käyttöön. Liian suuret varmuuskertoimet taas johtavat raskaisiin rakenteisiin, eikä tämä silti estä rakenteen vaurioitumista.

Koska rakenteen käyttäytymistä ei voida arvioida etukäteen ja jos älykästä kunnonvalvontaa ei ole käytössä, niin tällöin ainoa vaihtoehto on rakenteen rutiinitarkastukset. Ne taas vaativat resursseja, mistä syntyy lisäkustannuksia. Älykkään kunnonvalvontasysteemin avulla voitaisiin rakenteet suunnitella operoimaan turvallisella marginaalilla ilman, että niille tarvitsisi suorittaa erilaisia turvallisuutta takaavia tarkastuksia. Älykkään systeemin avulla voitaisiin siis suunnitteluvaiheessa käyttää kohtuullisempia varmuuskertoimia ja tämän avulla saada merkittäviä materiaalisäästöjä. Tällaisen vaurion tunnistussysteemin luominen ei ole missään nimessä helppoa, mutta sen tuomat edut kannustavat yrittämään. [6, s. 84]

2.3.1 Rakenteiden kunnonvalvonnan menetelmät

Kunnonvalvonta voidaan jakaa neljään monitieteelliseen alueeseen, joita yhdistävät sama tavoite, vaurioiden seuranta ja arviointi:

- *Structural Health Monitoring (SHM)*
- *Condition Monitoring (CM)*
- *Non-Destructive Evaluation (NDE)*
- *Statistical Process Control (SPC)*

Structural Health Monitoring (SHM), eli rakenteiden kunnonvalvonnalla tarkoitetaan yleisesti rakenteiden kuten lentokoneiden ja rakennusten reaaliaikaista seuranta sensoriverkon avulla. Tällaisissa käyttökohteissa yleisimpiä sensortyyppejä ovat optiset kuidut, sähkövastukseen perustuvat venymäanturit ja akustiset laitteet. Tarkoitus on havaita vaurio ja sen ominaisuudet mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Ominaisuuksia, joita vauriosta halutaan tietää, ovat vaurion sijainti, vaurion tyyppi ja vaurion vakavuus. [5, s. 1639.] Aikaisemmasta hieman eroten *Condition Monitoring (CM)* kohdistuu pyöriviin ja edestakaista liikettä toistaviin laitteisiin, joita yleisimmin käytetään tuotannossa. Tällaisissa laitteissa reaaliaikainen seuranta perustuu värähtelyyn ja kiihtyvyyssanturit toimivat parhaiten sensoreina. *Non-Destructive Evaluation (NDE)* seuranta ei suoriteta verkossa reaaliajassa vaan vasta sitten, kun vaurio on paikallistettu hyödyntämällä muiden reaaliajassa toimivien systeemien sensoreita. NDE:tä siis hyödynnetään pääasiassa

vaurion vakavuuden määrittämiseen. Käytettyjä menetelmiä ovat ultraääni, lämpökuvauus ja shearografia (3-ulotteinen laserkuvaus). *Statistical Process Control (SPC)* on itse prosessin seurantaan perustuva tilastollinen menetelmä, jossa hyödynnetään monia erilaisia sensoreita, joiden avulla pyritään havaitsemaan muutoksia prosessissa. [6, s. 85 – 86.]

2.3.2 Vaurion määrittely

Kaikki materiaalit ja täten myös kaikki rakenteet sisältävät virheitä nano- ja mikrotasolla. Koska kaikki materiaalit sisältävät virheitä ja eroavaisuuksia, on vaikeaa määrittää, milloin rakenne on vaurioitunut. Rakenteet suunnitellaan hyödyntäen materiaalien rikkoutumiseen liittyviä ominaisuuksia. Materiaalien ominaisuudet saattavat vaihdella valmistusprosessin ja materiaalien koostumuksen takia, jotka johtavat hieman erilaisiin mikrorakenteisiin ja mahdollisesti sulkeumiin, mikrosäröihin, huokoisuuksiin ja muihin virheisiin kuten epäpuhtauksiin. [5, s. 1641.]

Käytössä olevaan rakenteeseen vauriot syntyvät juuri edellä mainituista mikrotason virheistä. Yleisimmin vauriot alkavat kehittymään, kun rakenteeseen kohdistetaan dynaamista rasitusta. Tästä seuraa mikrotason virheiden kasvaminen ja sen seurauksena materiaalin ominaisuuksien muuttuminen. [6, s. 86.]

Rakenteessa olevien vaurioiden eteneminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen,

- *Defects* tarkoittaa nano- ja mikrotason virheitä, joita löytyy kaikista materiaaleista. Näillä virheillä ei ole mitään vaikutusta rakenteen tai systeemin toimintaan.
- *Damage* tarkoittaa vauriota, joka on muodostunut nano- ja mikrotason virheistä. *Damage* vaikuttaa rakenteen toimintaan, mutta ei tee rakenteesta toimintakyvyttöä.
- *Fault* tarkoittaa tilannetta, jossa rakenteen toimintakyky on heikentynyt huomattavasti eikä sen käyttöä voida jatkaa.

Nämä edellä mainitut asiat muodostavat toisiinsa hierarkkisen suhteen, esimerkiksi; nano- ja mikrotason virheet (*Defects*) johtavat isompiin vaurioihin (*Damage*) ja nämä taas

edelleen tilanteeseen, jossa rakenne ei ole enää toimintakykyinen (*Fault*). [5, s. 86. 6, s. 1641.]

2.3.3 Vaurion tunnistus

Kun rakenteen ominaisuudet ja käyttäytyminen ovat tiedossa, kuten se mitkä asiat johtavat tilanteeseen, jossa rakenne menettää toimintakykynsä (*Fault*), voi tarkastelun kohdentaa siihen, miten rakenteen vauriot havaitaan ja miten se saadaan aikaan älykkäästi. Älykkään kunnonvalvonnan tavoitteena onkin havaita vaurio (*Damage*), ennen kuin se johtaa rakenteen toimintakyvyttömyyteen (*Fault*), jotta sille voi välittömästi tehdä tarvittavat korjaavat toimenpiteet. Samoin kun vaurion määrittely voidaan myös vaurion tunnistaminen jakaa hierarkkiseen rakenteeseen, jossa vaurion tunnistaminen on jaettu viiteen vaiheeseen [5, s. 87.]:

- Havaitseminen (*Detection*): antaa indikaation siitä, että rakenteessa on vaurio. Tässä työssä keskitytään juuri vaurion havaitsemiseen rakenteesta mitattujen suureiden avulla.
- Paikallistaminen (*Localisation*): antaa informaatiota vaurion sijainnista rakenteessa.
- Luokittelu (*Classification*): antaa informaatiota vaurion tyypistä.
- Arviointi (*Assesment*): antaa informaatiota vaurion laajuudesta.
- Ennuste (*Prediction*): antaa informaatiota rakenteen turvallisuudesta, esimerkiksi arvion rakenteen kestoajasta.

Vaurion tunnistusta varten on pystyttävä keräämään riittävästi dataa rakenteesta, käyttökohteeseen sopivien sensoreiden avulla. Jotta oikeanlaista dataa saadaan kerättyä, on osattava tunnistaa, minkälaiset mittalaitteet sopivat juuri kyseessä olevaan kohteeseen ja saatava tieto siitä, miten mahdollinen vaurio vaikuttaa saatuun mittausdataan. Keskeisenä ongelmana onkin juuri se, että mikään anturi ei pysty itsessään ilmaisemaan, että rakenteessa on vaurio, vaan sensoreilla mitataan aina jotakin suuretta, kuten esimerkiksi kiihtyvyyksiä tai venymiä, mikä on liitettävissä mahdollisesti syntyvään vauri-

oon. Esimerkiksi kun rakenteen jäykkyys pienenee, ilmenee se rakenteen ominaisuu-
juuden pienenemisenä. Jotta vaurio voitaisiin tunnistaa ja tarkemmin määrittää, on ra-
kenteesta oltava vertailudataa (Training set) niin ehjistä rakenteista kuin myös erilai-
sista vauriotilanteista. [5, s. 89.]

Monet nykypäivänä käytössä olevista vauriontunnistustavoista perustuvat hahmontun-
nistukseen (Pattern recognition, PR). PR-algoritmi vertaa rakenteessa olevilta senso-
reilta saatua dataa käytössä olevaan vertailudataan. Jotta vaurion tunnistus toimii mah-
dollisimman tarkasti, on oltava kaikista erilaisista vauriotilanteista vertailudataa käytössä.
Sitä saadaan laskemalla, mallintamalla tai kokeellisilla menetelmillä. [5, s. 89.]

Monesti PR-algoritmit toimivat opettamalla diagnostiikalle esimerkkitalanteita, esimerkiksi
tuodaan systeemille vertailudataa ja pyydetään antamaan oikea arvio datasta, ja jos ar-
vio on väärin, verkko korjataan. Tätä kutsutaan ohjatuksi oppimiseksi. [5, s. 89.]

Tässä työssä tehtävässä vaurion tunnistuksessa hyödynnetään ohjaamatonta oppimista
(Novelty detection). Ohjaamattomassa oppimisessä diagnostiikan toiminta perustuu ver-
tailudataan, joka luodaan ehjistä rakenteista saadun mittausdatan perusteella. Vertai-
ludatan avulla luodaan niin sanottu normaalitilanteen malli, johon sensoreilta saatavaa
mittausdataa jatkuvasti verrataan. Jos mittausdatassa havaitaan suuria poikkeamia, al-
goritmi indikoi vauriosta. [5, s. 90.]

2.4 Virtual Sensing

Sensorteekniikkaa on käytössä lähes kaikkialla. Nykyteknologia mahdollistaa langatto-
man sensoriverkoston asentamisen, jossa voidaan käyttää suuria määriä edullisia pieni-
rakenteisia anturisolmuja. Tästä huolimatta osa rakenteessa olevista sijainneista on sel-
laisia, jonne ei ole hyödyllistä tai mahdollista asentaa sensoria. Tämän takia vasteen
tarkka estimoiminen käytettävissä olevan mittausdatan avulla tekisi rakenteen väsymis-
arvioinnista luotettavampaa. [10, s. 1.]

Virtual Sensing (VS)-tekniikat estimoivat mittaamattomia suureita käytettävissä olevien
fyysisten sensoreiden avulla. Värähtelymittauksissa lineaaristen rakenteiden vasteiden

voidaan olettaa sisältävän kaikkien moodien vaikutusta, jossa vain muutama ominaisuusmuoto on aktiivisena. Tämän oletuksen perusteella sensorien rajallinen määrä on riittävä tekemään sensoriverkosta redundantin. [10, s. 1.]

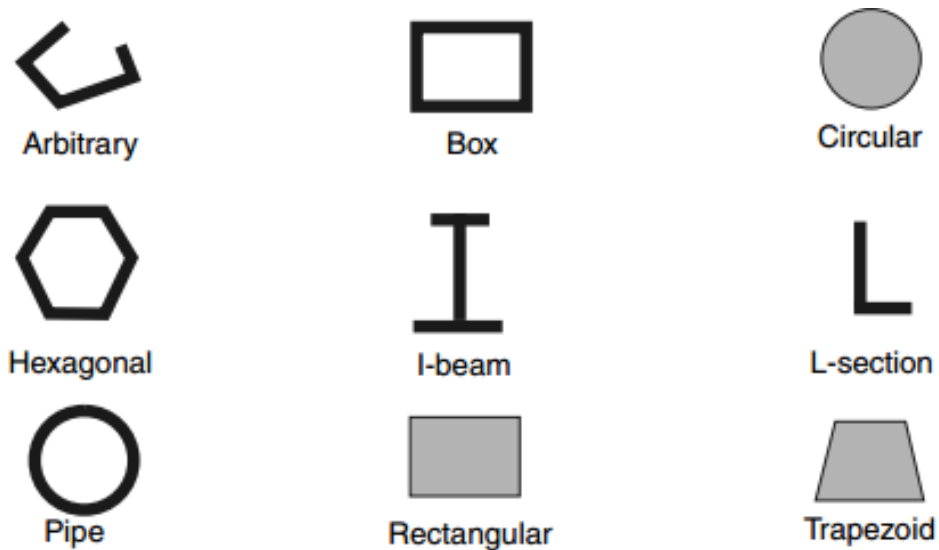
Virtual Sensing voi olla analyttistä (malliin perustuva) tai empiiristä (mittausdataan perustuva). Analyttisessä VS-tekniikassa estimoinnin laskennassa käytetään FEM-mallia ja rajatulta määrältä sensoreita saatavaa mittausdataa yhdessä. Esimerkiksi jännitykset tai venymät voidaan laskea kiihtyvyyksimittauksien avulla. Analyttisiä moodimuotoja voidaan käyttää perustana vasteen määrittämiselle mitattomissa rakenteen kohdissa laajennusalgoritmin avulla. Empiiristä VS:ää voidaan käyttää väliaikaisesti paikkaamaan väliaikaisia tai vioittuneita antureita. Näiden kahden yhdistelmä on myös olemassa. Yhdistelmässä käytetään analyttistä VS:ää sekä empiiristä VS:ää. Yhdistelmäalgoritmin tavoitteena on poistaa VS-menetelmiin liittyviä epävarmuuksia, jotka johtuvat mitausepävarmuuksista ja mallinusepävarmuuksista. [10, s. 1 – 2.]

3 FEM-simulointi

3.1 Palkki- ja kuorimalli

Palkkielementejä käytetään sellaisten rakenteiden mallinnuksessa, joiden pituus dimensio on huomattavasti suurempi kuin kaksi muuta dimensiota ja pituus suuntaiset rasitukset ovat merkittävimmät. Palkkiteoria perustuu oletukseen, että rakenteen muodonmuutokset voidaan määrittää niiden muuttujien avulla, jotka ovat aseman funktioita rakenteen pituudella. Palkkiteorialla voi tuottaa luotettavia tuloksia, kun poikkileikkauksen mitat ovat enintään 1/10 rakenteen tyypillisestä aksiaalisesta pituudesta. [7, s. 6-1.]

Abaqus-ohjelmistossa palkkimallin poikkileikkauksen muodon ja mitat voi määrittää kolmella tavalla; valitsemalla valmiin profiilityypin Abaquksen poikkileikkauksikirjastosta ja määrittämällä poikkileikkauksen mitat; valitsemalla yleisen profiilin (*Generalized profile*) ja määrittämällä poikkileikkaukselle teknisiä ominaisuuksia kuten pinta-ala ja jäyhyysmomentti; tai käyttämällä verkkoa erityisistä kaksiulotteisista elementeistä, joiden geometriset suureet ratkaistaan numeerisesti, tätä kutsutaan verkotetuksi poikkileikkaukseksi [7, s. 6-1.] Abaqus tarjoaa runsaasti valmiiksi mallinnettuja poikkileikkauksia (kuva 3).



Kuva 3 Palkkimallin poikkileikkauksia [7]

Kuorielementeillä mallinnetaan rakenteita, joilla rakenteen paksuus dimensio on huomattavasti pienempi kuin kaksi muuta dimensiota ja joissa paksuuden suuntaiset rasitukset ovat merkityksettömän pieniä. Rakenteet, joiden seinämän paksuus on enintään 1/10 rakenteen globaalista ulottuvuudesta, kuten paineastiat, voidaan mallintaa kuorielementeillä. Abaquksessa on käytössä kaksi erilaista kuorielementtiä: tavanomainen kuorielementti sekä jatkuvuus-kuorielementti. Tavanomainen kuorielementti diskretisoi referenssitason määrittelemällä elementin tasomaiset mitat, pinnan normaalin ja kaarevuuden. Tavanomaisen kuorielementin solmupisteet eivät määrittele kuoren paksuutta; paksuus määritellään poikkileikkauksen ominaisuuksilla. Jatkuvuus-kuorielementit taas edustavat kolmiulotteisia kiinteitä elementtejä siten, että ne diskretisoivat koko kolmiulotteisen rungon, mutta on muotoiltu niin, että ne kinemaattisten ja konstitutiivisten käyttäytymisten perusteella vastaavat tavanomaista kuorielementtiä. Jatkuvuus-elementeillä voidaan mallintaa kontakteja tarkemmin kuin tavanomaisella kuorielementillä. [7, s. 5-0.]

3.2 Linear Dynamics

Linearisessa analyysissä rakenteeseen kohdistetulla voimalla ja rakenteen reaktiolla kohdistettuun voimaan on suora yhteys. Esimerkiksi jousi, joka venyy yhden metrin verran, kun siihen kohdistetaan yhden newtonin voima, venyy kaksi metriä kun siihen kohdistetaan kahden newtonin voima. Abaqus/Standardin linearisessa analyysissä rakenteen joustavuus tarvitsee laskea vain kerran, eli Abaqus/Standard muodostaa rakenteelle jäykkyyismatriisin ja kääntää sen. Rakenteen lineaarinen reaktio muissa tilanteissa löytyy kertomalla käänteinen jäykkyyismatriisi uusien kuormien voimavektorilla. Lisäksi rakenteen reaktio erilaisiin kuormitustilanteisiin voidaan skaalata sopivilla kertoimilla ja/tai kerrostaa kuormitustilanteet, jotta voidaan määrittää rakenteen reaktio täysin uudelle kuormitustilanteelle. Tätä tapaa käytettäessä on oletus, että kuormitustilanteet ovat aiempien kuormitusten summa tai monikerta. Kuormitusten yhteenlaskuperiaate olettaa, että kaikissa kuormitustilanteissa on käytössä samat reunaehdot (kiinnitykset). [7, s. 7-0.]

Suoritettaessa lineaarista tutkimusta, jossa on kiinnostuttu rakenteen pitkäkestoisesta reaktiosta voimaa kohtaan, voidaan käyttää staattista analyysia. Sen sijaan tilanteessa, jossa tutkittavaan rakenteeseen kohdistuu voimia, joiden suuruus vaihtelee ajan suhteen nopeasti, pitää käyttää lineaarista dynaamista analyysia. [7, s. 7-0.]

Dynaamisessa analyysissä inertiaivoimat on sisällytetty dynamiikan tasapainoyhtälöön:

$$M\ddot{u} + I - P = 0 \quad (9)$$

jossa

M	on rakenteen massa
\ddot{u}	on rakenteen kiihtyvyys
I	on rakenteen sisäiset voimat
P	on rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset voimat.

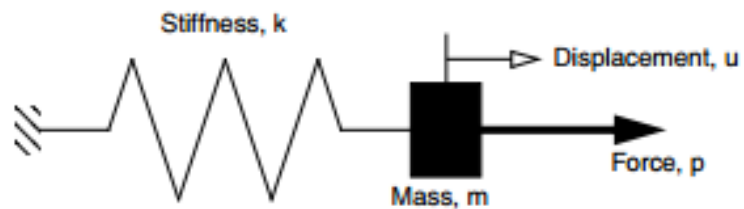
Edellä esitetyssä yhtälössä on kyse Newtonin toisesta laista, $F = ma$. Inertiavoimien ($M\ddot{u}$) lisääminen tasapaino yhtälöön on keskeinen ero staattisen ja dynaamisen analyysin välillä. Toinen merkittävä ero mainittujen analyysien välillä on sisäisten voimien mää-

rittely, *I*. Staattisessa analyysissä sisäisiä voimia syntyy vain rakenteen muodonmuutoksesta, kun taas dynaamisessa analyysissä sisäiset voimat sisältävät voimia, jotka ovat muodostuneet rakenteen liikkeestä (esimerkiksi vaimennuksesta) ja rakenteen muodonmuutoksesta. [7, s. 7-1.]

3.2.1 Ominaismuodot yleisesti

Yksinkertaisin dynamiikan ongelma on jouseen kiinnitetty värähtelevä massa (kuva 4). Jousen sisäiset voimat voidaan ilmaista Ku :n avulla, jolloin dynaaminen liikeyhtälö on muotoa

$$M\ddot{u} + Ku - p = 0 \quad (10)$$



Kuva 4 Spring-mass system [7]

Kyseisellä massa-jousi-systeemillä on ominaistaajuus, joka saadaan ratkaistua kaavalla (1), mikä on aiemmin esitetty tässä työssä. [7, s. 7-2.]

Jos massaan kohdistetaan pakkosiirtymä, joka vapautetaan, alkaa massa värähdellä ominaistaajuudella. Jos massaan kohdistettaisiin voimaa ominaistaajuudella, alkaisi siirtymän amplitudi äkillisesti kasvamaan, tätä ilmiötä kutsutaan resonanssiksi. [7, s. 7-2.]

Todellisissa rakenteissa on suuri määrä ominaistajuuksia. On tärkeää suunnitella rakenne sillä tavoin, että taajuudet, joilla rakennetta kuormitetaan, eivät olisi lähellä rakenteen ominaistajuuksia. Ominaisajuuksia voi määrittää kuormittamattoman rakenteen dynaamisen reaktion avulla (kun $P = 0$ dynaamisessa tasapainoyhtälössä). Liikkeyhtälöksi muodostuu

$$M\ddot{u} + I = 0 \quad (11)$$

Vaimentamattomalle systeemille $I = Ku$, joten

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (12)$$

Yhtälön ratkaisut ovat muotoa

$$u = \phi e^{i\omega t} \quad (13)$$

Sisällyttämällä tämä dynaamiseen liikkeyhtälöön, saadaan ominaisarvotehtävä

$$K\phi = \lambda M\phi \quad (14)$$

jossa $\lambda = \omega^2$

Jokaisessa systeemissä on n ominaisarvoa, jossa n on vapausasteiden määrä FEM-mallissa. Ominaisajuuksianalyysin avulla Abaqus/Standardissa voidaan määrittää rakenteen ominaismuodot ja ominaistajuuksia. [7, s. 7-2.]

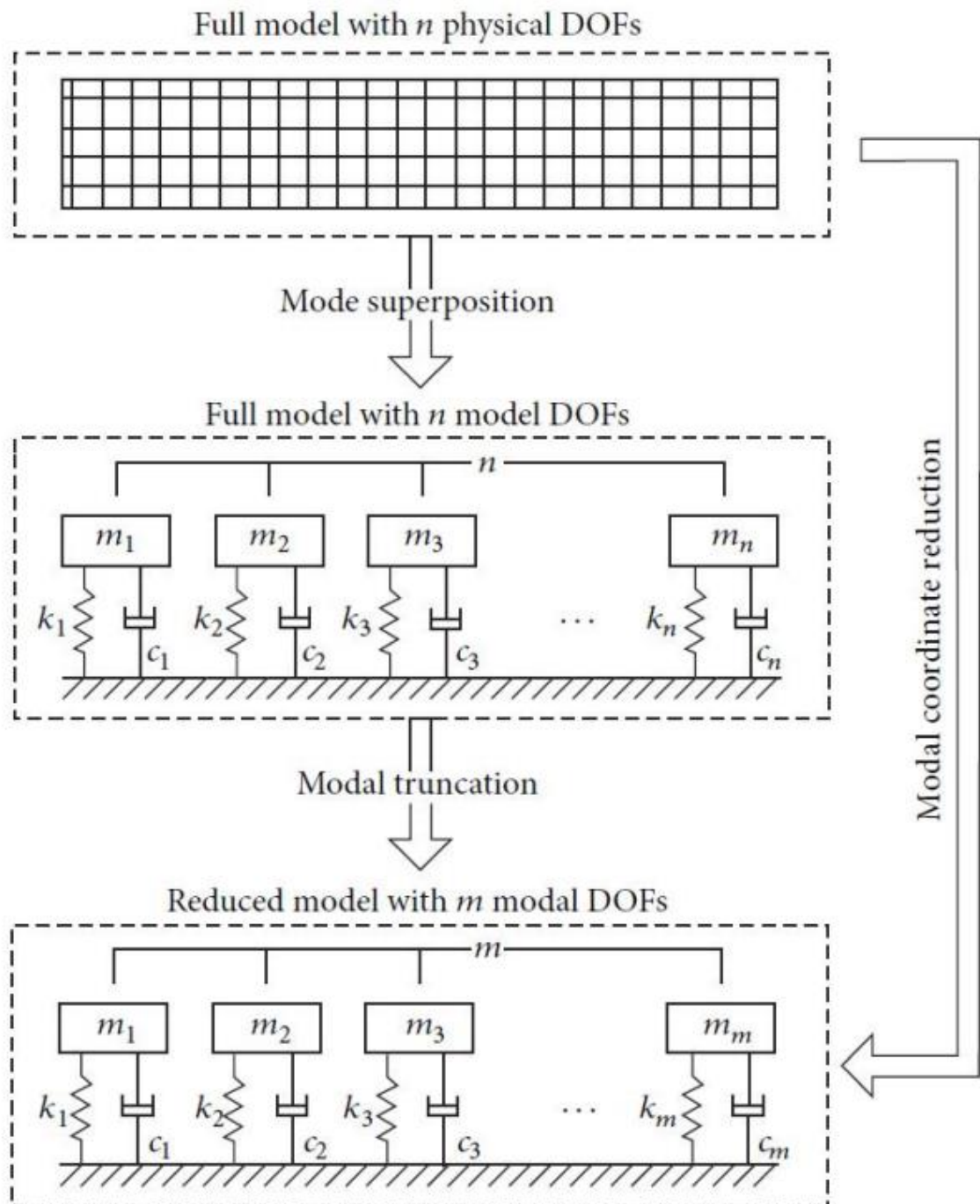
3.2.2 Oinaismuotojen superponointi

Rakenteen ominaistajuuksien ja ominaismuotojen avulla voidaan kuvata sen dynaamista reaktiota, kun sitä kuormitetaan. Rakenteen muodonmuutokset voidaan laskea käyttämällä ominaismuotojen superponointitekniikkaa. Jokaisen ominaismuodon muoto kerrotaan skaalauskerroimella. Mallin siirtymävektori, u , on määritelty

$$x = \sum_{i=1}^N \phi_i q_i \quad (15)$$

jossa ϕ_i on modaalinen siirtymä ja q_i on i ominaismuodon yleistetty koordinaatti. Tätä tekniikkaa voi käyttää vain simuloinneissa, joissa siirtymät ovat pieniä, materiaalit elastisia ja lineaarisia eikä ole kontaktiehtoja. Oinaismuotojen superponointimenetelmää voi siis käyttää vain lineaarisille systeemeille.

Rakenteellisen dynamiikan ongelmissa rakenteen vasteita hallitsee suhteellisen pieni määrä ominaismuotoja, mikä tekee ominaismuotojen superponoinnista tehokkaan menetelmän, kun lasketaan vastaavien systeemien vasteita. Esimerkki superponoinnin eduista on, että kun mallinnetaan rakenne, jossa on 10 000 vapausastetta dynaamisten liikeyhtälöiden suora integrointi vaatisi 10 000 yhtälön ratkaisun jokaisella ajan hetkellä. Jos rakenteen reaktiota kuvataan 100 ominaismuodolla vaaditaan vain 100 yhtälön ratkaisu jokaisen aikainkrementin kohdalla. Tämän menetelmän avulla on mahdollista säästää huomattava määrä kallista laskenta-aikaa. Oinaismuotojen superponoinnin menetelmän keskeinen ajatus on havainnollistettu kuvassa 5. [7, s. 7-3.]



Kuva 5 Oinaismuotojen superponoinnin periaate

Ominaismuotojen superponointi

Vaimentamattoman monen vapausasteen systeemin liikeyhtälö on muotoa

$$M\ddot{x} + Kx = f(t) \quad (16)$$

Ominaismuotojen superponoinnin avainvaihe on koordinaattimuunnos

$$x(t) = \Phi q(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i q_i(t) \quad (17)$$

Koordinaatteja $q_i(t)$ kutsutaan moodikoordinaateiksi.

Koska moodimatriisi Φ on vakio, niin

$$\dot{x}(t) = \Phi \dot{q}(t) \quad (18)$$

$$\ddot{x}(t) = \Phi \ddot{q}(t)$$

Sijoittamalla edellä mainitut kaavaan (17) ja kertomalla ϕ_i^T :lla saadaan,

$$M\ddot{x} + Kx = f(t)$$

$$M\Phi \ddot{q}(t) + K\Phi q(t) = f(t)$$

$$\phi_i^T M\Phi \ddot{q}(t) + \phi_i^T K\Phi q(t) = \phi_i^T f(t) \quad (19)$$

jossa

$$\phi_i^T M\Phi \ddot{q}(t) = \phi_i^T M\phi_1 \ddot{q}_1 + \phi_i^T M\phi_2 \ddot{q}_2 + \dots + \phi_i^T M\phi_N \ddot{q}_N \quad (20)$$

$$= \phi_i^T M\phi_i \ddot{q}_i$$

$$= M_i \ddot{q}_i$$

ja

$$\begin{aligned}
\phi_i^T K \Phi \ddot{q}(t) &= \phi_i^T K \phi_1 q_1 + \phi_i^T K \phi_2 q_2 + \dots + \phi_i^T K \phi_N q_N \\
&= \phi_i^T K \phi_i q_i \\
&= K_i q_i
\end{aligned} \tag{21}$$

Ratkaisujen avulla yhtälö (19) voidaan nyt kirjoittaa muotoon

$$M_i \ddot{q}_i(t) + K_i q_i(t) = F_i(t) \tag{22}$$

jossa modaalikuormitus on

$$F_i(t) = \phi_i^T f(t) \tag{23}$$

Yhtälö (22) on yhden vapausasteen systeemin i moodin liikeyhtälö. Se on itsenäinen ratkaisu ja voidaan ratkaista erikseen käyttämällä yhden vapausasteen menetelmiä määritetyllä aika-alueella tai taajuuksalueella. Yhtälö voidaan muuttaa muotoon:

$$\ddot{q}_i(t) + \frac{K_i}{M_i} q_i(t) = \frac{F_i(t)}{M_i} \tag{24}$$

tai

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{F_i(t)}{M_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{25}$$

Yleisimmin rakenteellisen dynamiikan laskennassa käytetty vaimennustyyppi on modaalinen vaimennus (*Modal damping*), jossa ζ_i on i moodin vaimennuskerroin. Vaimennusmatriisia $[c]$ ei muodosteta, mutta vaimennus esitetään ainoastaan yksittäisten moodien liikeyhtälöissä (25). Moodien vaimennuskertoimet ovat usein kokeellisiin tutkimuksiin perustuvia arvauksia.

Lisätään vaimennuskerroin ζ_i :

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = \frac{F_i(t)}{M_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (26)$$

Moodikoordinaatit $q_i(t)$ ratkaistaan N (tai $n < N$) määrästä yhden vapausasteen yhtälöitä. Ratkaisu muutetaan takaisin fyysisiksi koordinaateiksi käyttämällä kaavaa (17). [13]

3.2.3 Vaimennus

Abaqus/Standardissa on mahdollista määrittellä kolme erilaista vaimennusta transientti-analyysille; *Direct modal damping*, *Rayleigh damping* ja *Composite modal damping*. Vaimennus määritellään modaalisille dynaamisille menetelmille. Vaimennus on osa analyysiaskeleen määrittelyä, ja jokaiselle ominaistajuudelle eli moodille voidaan määrittää eri suuruinen vaimennuskerroin.

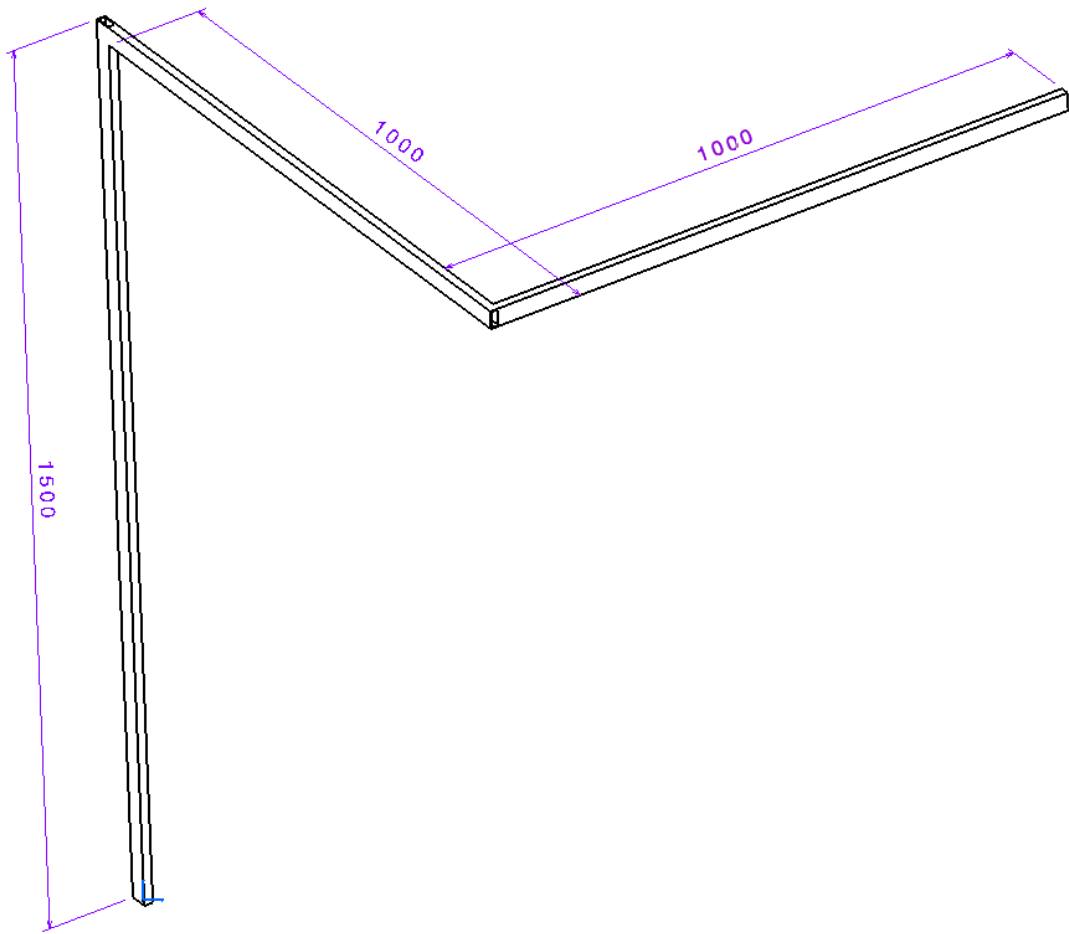
Tässä työssä käytetään 2 % *Direct modal damping*-vaimennusta jokaiselle moodille, joka ilmenee rakenteessa 0 - 400 Hz taajuudella. Tyypillisesti vaimennuskertoimen arvot ovat välillä 1 % - 10 %. [8, s. 7-2.]

4 Analysoitava rakenne

4.1 Rakenteen ideointi

4.1.1 Rakenteen mitoitus ja mallintaminen

Tässä työssä käsiteltävä rakenne on kohtalaisen yksinkertainen kolmiulotteinen teräsraakenne. Rakenteeseen kuuluu kolme osaa: pystyputki, jonka pituus 1,5 m ja kaksi vaakaputkea, kummankin pituus 1 m. Rakenne valmistetaan suorakulmaisesta teräsputkesta, jonka profiili on suunniteltava sopivan kokoiseksi. Rakenne on pystyputken tyvestä kiinteästi kiinnitettynä maahan. Todellinen rakenne mittoineen on esitetty kuvassa 6.



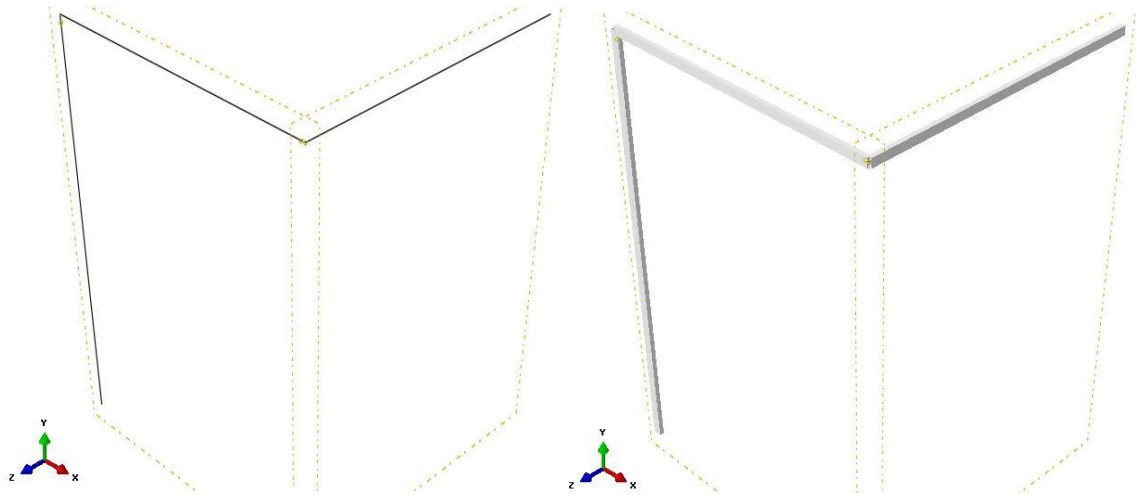
Kuva 6 Todellinen rakenne

Materiaalille määritetyt ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Käytetyn materiaalin ominaisuudet

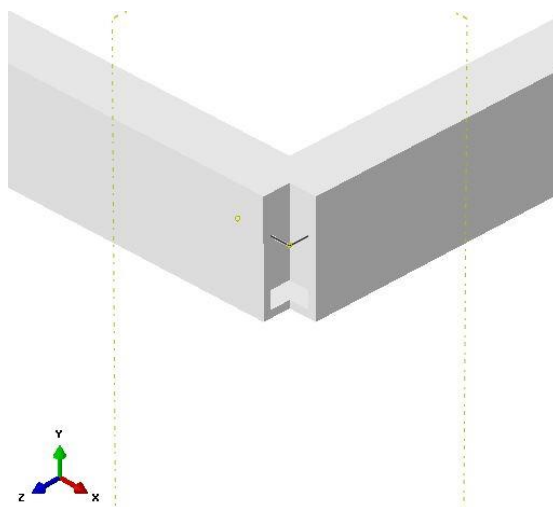
Kimmokerroin	210 GPa
Tiheys	7 850 kg/m ³
Poissonin-luku	0,3

Rakenteesta tehdään kaksi mallia, palkkimalli ja kuorimalli. **Palkkimalli** (kuva 7) mallinetaan palkkielementeillä ja on yksinkertaistettu versio todellisesta rakenteesta. Palkkimallia hyödynnetään analyttisessä *Virtual sensing*:issä ja fyysisten antureiden optimaalisten sijaintien määrittelyssä.



Kuva 7 Mallinnettu palkkimalli ja palkkimalliin prosijoitu profiili

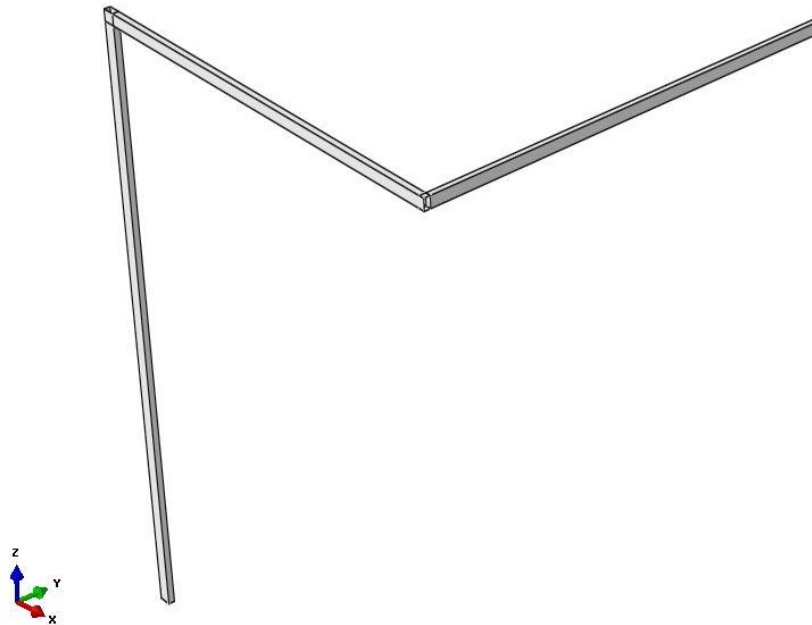
Palkkimalli sisältää mallinnustekniikasta johtuen mallinnusvirhettä. Rakenne mallinetaan niin sanottuna rautalankamallina rakenteen keskilinjoja pitkin. Abaqus projisoi rakenteelle määritetyn profiilin mallinnetun rautalankamaisen rungon päälle. Virhettä syntyy rakenteessa oleviin jyrkkiin mutkiin, jotka ovat tässä työssä rakenteen eri osien liitospaikat. Liitospaikkiin syntyy päällekkäisyyksiä ja aukkoja. Rakenteeseen syntyvä mallinnusvirhe on havainnollistettu kuvassa 8.



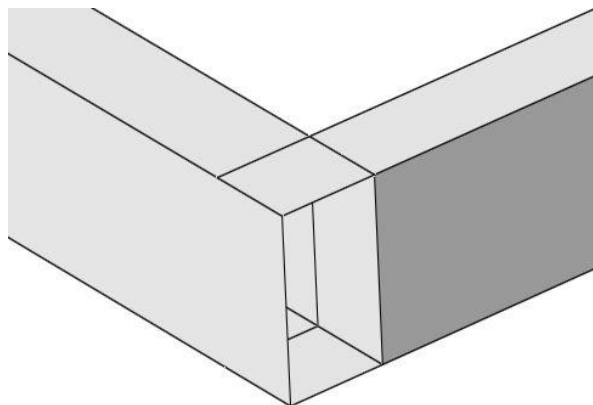
Kuva 8 Palkkimallin liitokohtaan syntyvä mallinnusvirhe

Kuorimalli (kuva 9) mallinnetaan kuorielementeillä, ja se vastaa niin sanottua todellista rakennetta. Kuorimallin mallinnustekniikka vastaa hyvin paljon normaalia 3D-mallinnusta: Ainoana erona se, että mallinettavan seinämän paksuus on nolla. Rakenne mallinnetaan pursottamalla haluttua profiilia määrämittäisiin niille määritetyille sijainneille. Tällä mallinnustekniikalla päästään täsmällisempään lopputulokseen, jonka ansiosta rakenteessa olevat liitoskohdat on mahdollista luoda realistisemmin. Kuorimalli toimii tässä työssä todellisen rakenteen korvikkeena.

Kumpikin käytettävistä malleista mallinnetaan yhtenä kappaleena, eli mitään erillisiä liitoksia ei Abaquksella luoda. Liitoskohtina on käsitelty malliin rakenteen eri osien välille muodostuvia 90 asteen kulmia, jotka ovat ongelmakohtia rakenteen mallinnuksessa.



Kuva 9 Kuorimalli

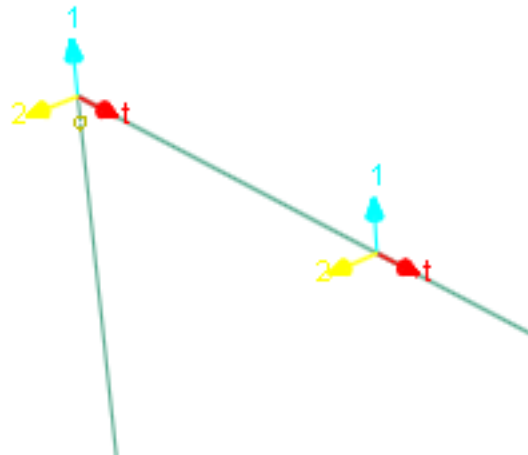


Kuva 10 Kuorimallin liitoskohta

4.1.2 Profiilin valinta

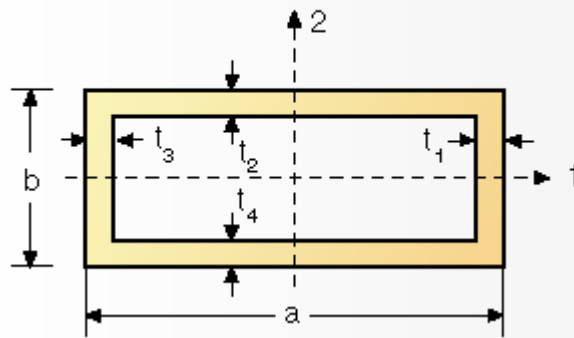
Rakenteen suunnitteluun kuuluu sopivan kokoisen profiilin valinta. Reunaehtona toimii rakenteen alhaisin ominaistaajuus, joka suurilla rakenteilla on noin 2 Hz. Rakenteen ominaistaajuuksien tutkimisessa käytetään palkkimallia muun muassa sen nopean muokattavuuden takia. Tämä liittyy palkkimallin mallinnustekniikkaan, eli sitä mallintaessa hahmotellaan vain rakenteen keskilinjaa pitkin menevät viivat. Kun rakenne on hahmoteltu keskiviivoja pitkin, valitaan rakenteelle profiilin tyyppi. Se voi olla esimerkiksi neliö, suorakulmio, kolmio ja niin edelleen. Kun profiilityyppi on valittu ja mitat määritetty, Abaqus projisoi rakenteen valitun profiilin mukaan, rakenteen profiilia ei tarvitse erikseen mallintaa rakenteeseen. Tämän takia on huomattavasti nopeampaa muuttaa profiilia palkkimallissa kuin kuorimallissa, jossa rakenne mallinnetaan käytetyn profiilin mukaan.

Palkkimallia käytettäessä on muistettava määrittää palkin profiilin lokaalien koordinaattien suunnat 1 ja 2, näiden koordinaattien avulla Abaqus asettaa profiilin mallinnettuun rakenteeseen sille määritettyyn asentoon. Profiilin lokaalit suunnat näkyvät kuvassa 12 ja rakenteeseen määritetyt lokaalit suunnat kuvassa 11.



Kuva 11 Palkkimallin lokaalit suunnat

Shape: Box



Kuva 12 Palkkimallin profiilityyppi, Box

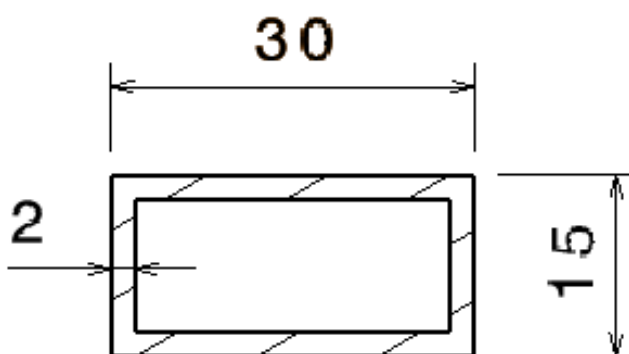
Tässä työssä rakenteen profiilin tyyppinä käytetään suorakulmaista teräsputkea. Rakenteen mallintamista varten profiilin tyyppiä valitaan Abaquksessa suorakulmainen profiili, *Box* (kuva 12). Jotta rakenne on myös todellisuudessa valmistettavissa, täytyy profiilin olla sellainen, mitä on saatavissa kaupan hyllyltä. Profiilin valikointi suoritettiin iteroimalla SSAB:n teräsputkivalikoimasta [9] löytyviä erikokoisia suorakulmaisia profiileja. Ominais-
taajuusanalyysin avulla jokaiselle profiilille lasketaan ominaistaajuudet 0 - 200 Hz asti, kunnes rakenteelle löytyy profiili, jonka alhaisin ominaistaajuus vastaa tavoiteltua 2 Hz taajuutta.

Palkkimallin ominaistaajuusanalyysin tuloksia muutamille erikokoisille profiileille näkyy taulukossa 2. Vertailuun on otettu eri profiilien 10 alhaisinta ominaistaajuutta mukaan.

Taulukko 2 Profiilien ominaistaajuus vertailu

Moodi/Profiili	Taajuudet (Hz)		
	70 x 40 x 1,5 mm	50 x 30 x 1,25 mm	30 x 15 x 2 mm
1	5,789	4,2756	2,0348
2	8,742	6,3237	3,3229
3	16,660	12,235	6,0366
4	19,409	14,150	7,1905
5	43,648	31,633	16,489
6	51,639	38,219	18,377
7	120,610	89,538	41,856
8	180,370	129,64	70,091
9	208,840	155,38	74,341
10	287,480	209,85	102,30

Tuloksista nähdään, miten rakenteen jäykkyys vaikuttaa ominaistajuuksiin. Rakenteen jäykkyyttä pienentäessä, eli käyttämällä pienempää profiilia, ominaistajuudet saadaan pienenevänsä. Tämä voidaan todeta ominaistajuuden kaavasta $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Tehdyn ominaistajuusanalyysin tulosten perusteella sopiva profiili on 30 x 15 x 2 mm profiili. Profiilin poikkileikkaus kuvassa 13.



Kuva 13 Profiilin poikkileikkaus

4.1.3 Kuorimallin validointi

Kuorimalli mallinnetaan valikoituneen 30 x 15 x 2 mm profiilin perusteella ja sen validointi suoritetaan vastaavalla ominaistajuusanalyysillä ja tuloksien vertailulla. Taulukossa on listattuna palkkimallin ja kuorimallin 10 alhaisinta ominaistajuutta mallinnettuna samalla profiililla.

Taulukko 3 Palkkimallin ja kuorimallin ominaistajuuksien vertailu

Moodi/Malli	Taajuudet (Hz)	
	Palkkimalli	Kuorimalli
1	2,0348	1,977
2	3,3229	3,381
3	6,0366	6,068
4	7,1905	6,786
5	16,489	15,352
6	18,377	17,489
7	41,856	41,561
8	70,091	66,470
9	74,341	74,813
10	102,30	90,802

Suoritettujen vertailujen perusteella on todettavissa, että kuorimalli vastaa palkkimallia riittäväällä tarkkuudella. Tuloksista on huomioitava se, että vaikka palkkimallin alhaisin ominaistajuuksien on kuorimallia suurempi, ei se ole systemaattisesti jokaisen moodin kohdalla suurempi vaan tulokset vuorottelevat. Tuloksien eroavaisuuteen voivat vaikuttaa erot mallinnustekniikassa ja elementtiverkossa. Kuorimallissa on huomattavasti tiheämpi elementtiverkko käytössä, elementtiverkkoja käsitellään myöhemmin lisää tässä työssä.

4.2 Ominaistajuuksien ja -muodot

Tässä kappaleessa vertaillaan simulointimallien ominaistajuuksia numeerisesti ja ominaismuotoja graafisesti. Tämän lisäksi käsitellään hieman MAC-ominaismuotojen samankaltaisuusvertailun teoriaa ja tarkastellaan saatuja tuloksia.

4.2.1 Ominaistaajuuksien ja -muotojen vertailu

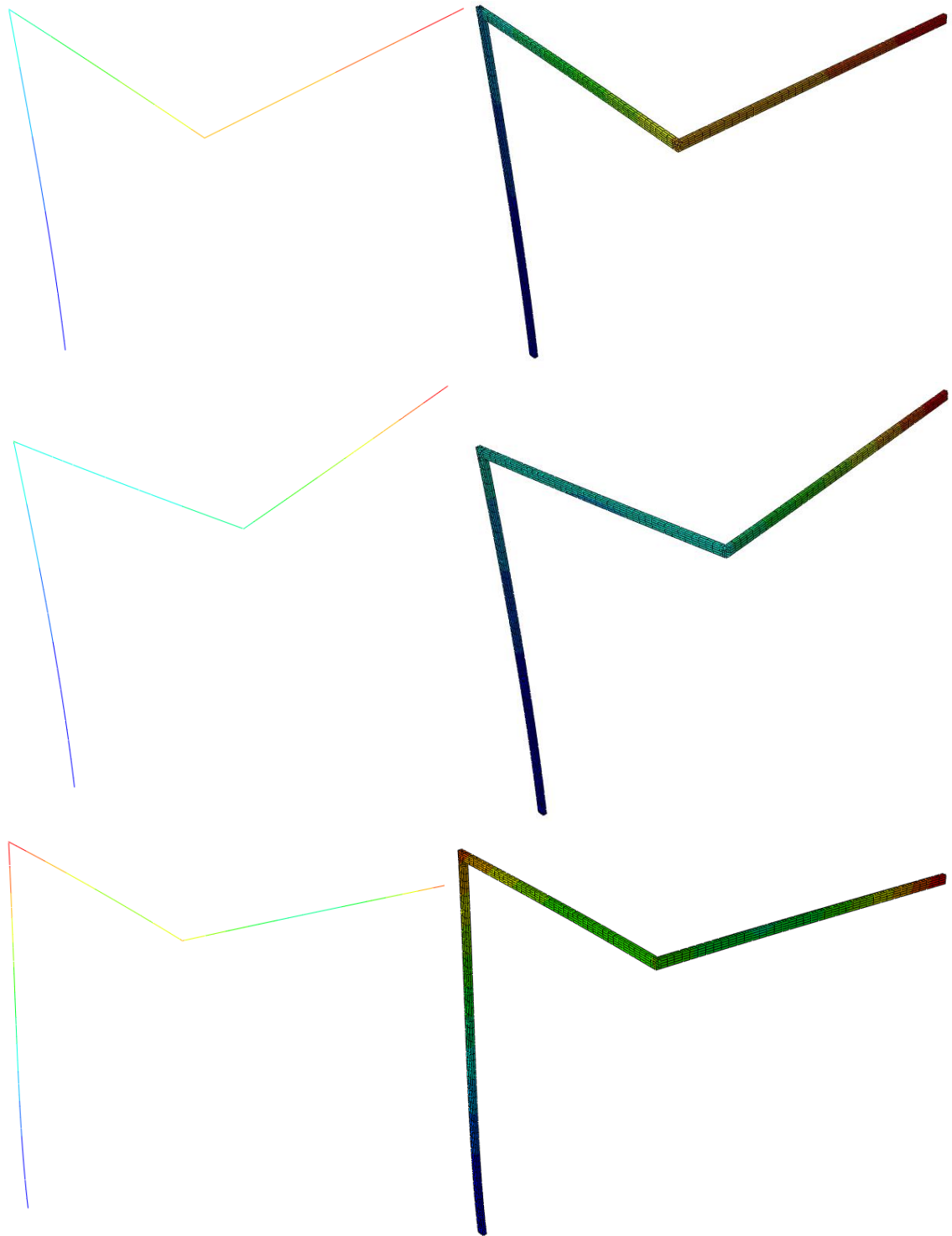
Tavoitteena oli luoda kaksi vastaavanlaista FEM-mallia. Palkkimallin ominaistaajuusanalyysin avulla rakenteelle määritettiin profiili, jonka mukaan fyysinen rakenne mallinnetaan. Kuvissa 14 - 17 vertaillaan palkki- ja kuorimallin ominaismuotoja graafisesti. Ominaismuotojen tulee vastata toisiaan mahdollisimman hyvin.

Ominaismuotojen graafisen vertailun havainnollistamiseksi taulukossa 4 näkyvät mallien moodeja vastaavat ominaistaajuudet.

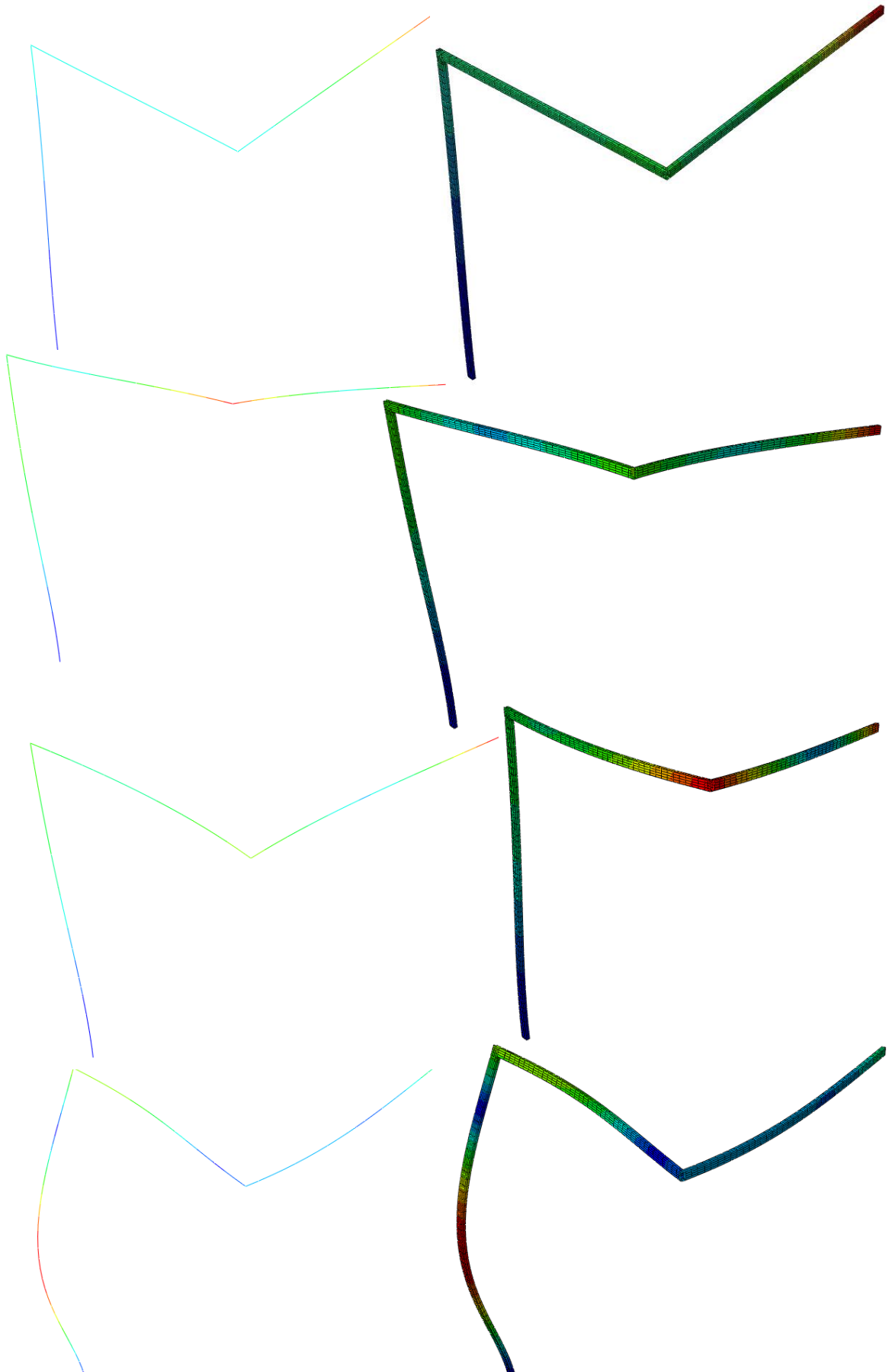
Taulukko 4 FEM-mallin ja fyysisen rakenteen ominaistaajuudet

Moodi	Ominaistaajuudet (Hz)	
	FEM-malli (Palkkimalli)	Fyysinen rakenne (Kuurimalli)
1	2,035	1,977
2	3,323	3,381
3	6,0366	6,068
4	7,191	6,786
5	16,489	15,352
6	18,377	17,489
7	41,856	41,561
8	70,091	66,470
9	74,341	74,813
10	102,30	90,802
11	118,11	115,16
12	126,95	126,55
13	174,87	166,27

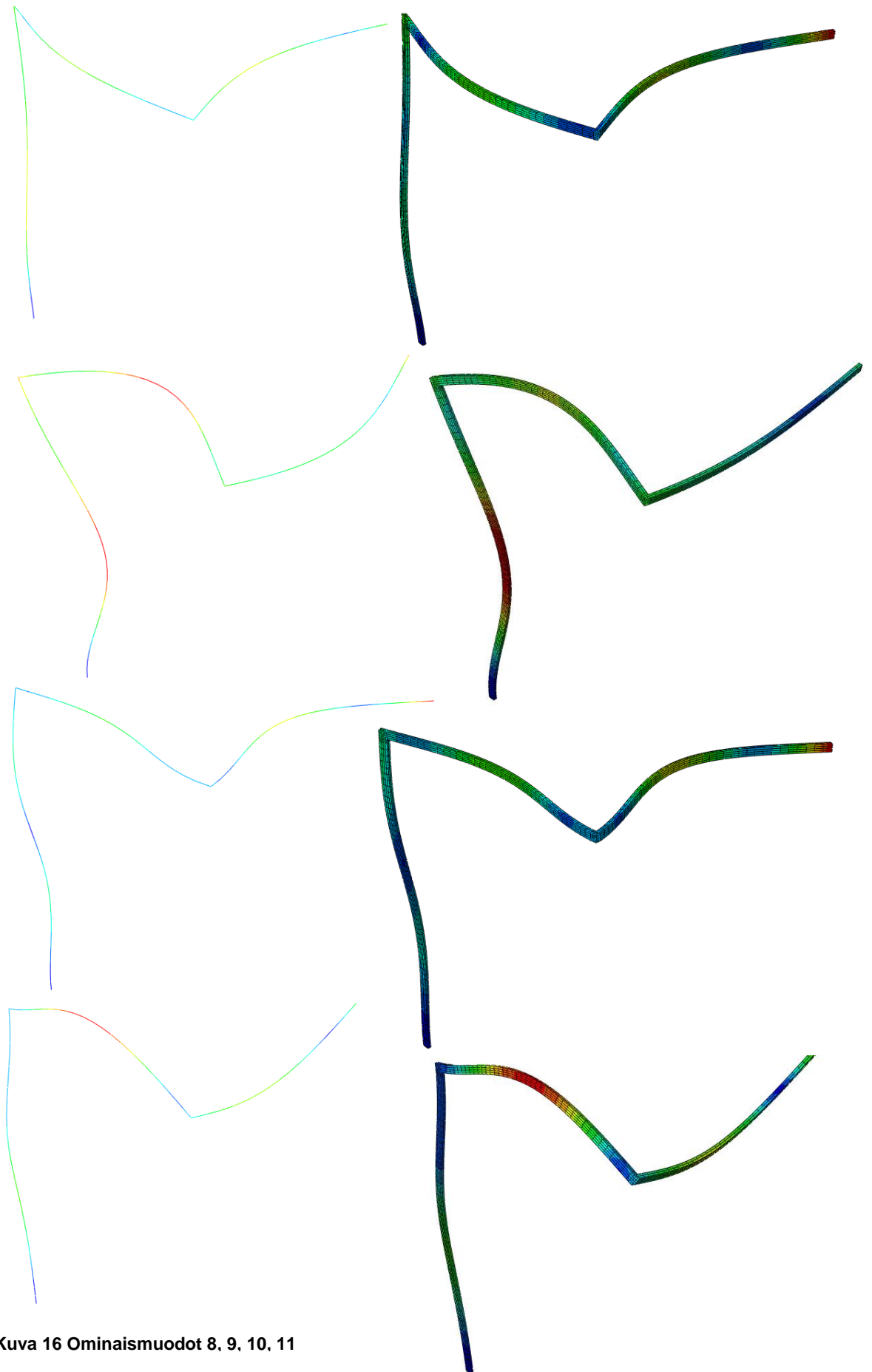
FEM-mallin (vasen) ja fyysisen rakenteen (oikea) ominaismuotojen graafinen vertailu



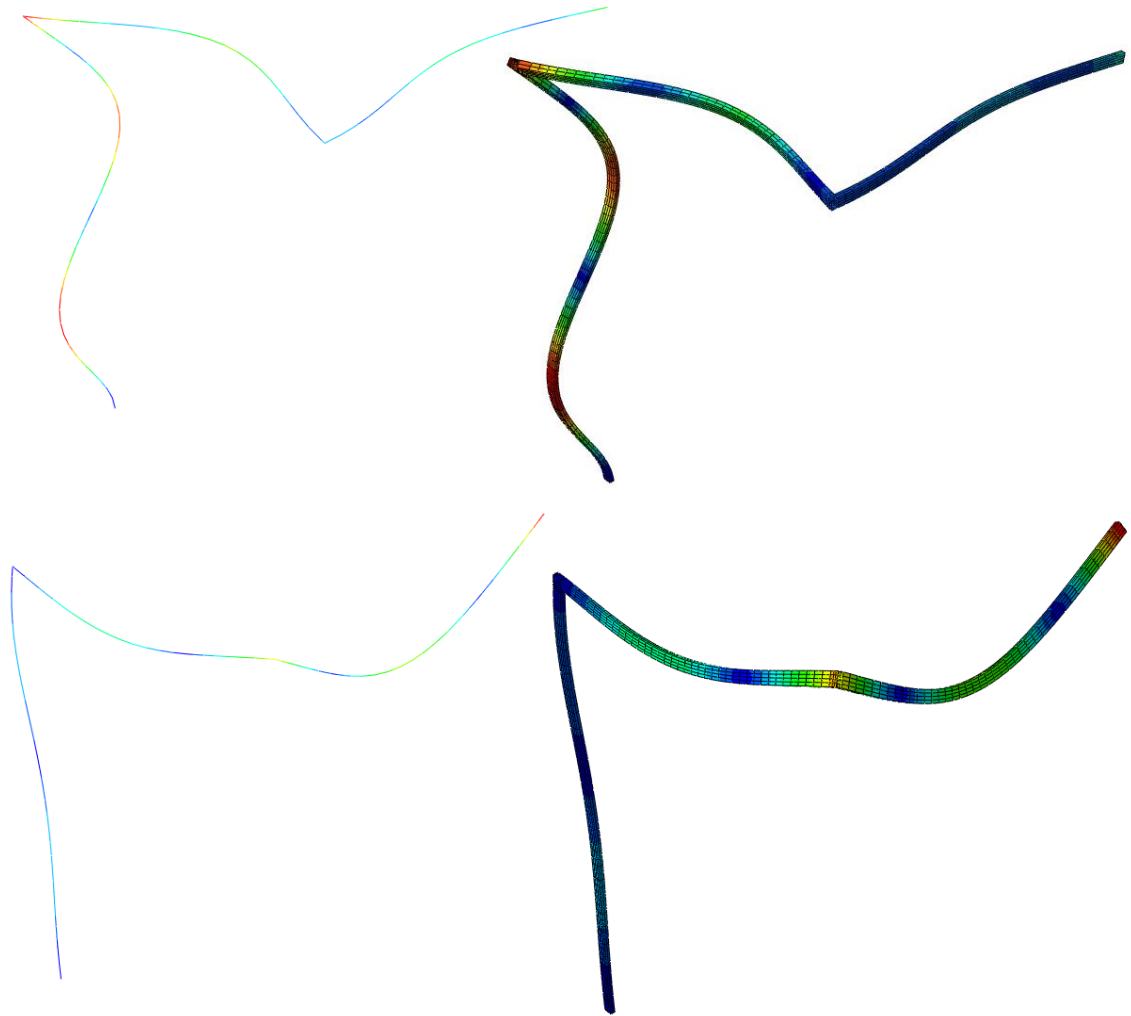
Kuva 14 Ominaismuodot 1, 2, 3



Kuva 15 Oinaismuodot 4, 5, 6, 7



Kuva 16 Oinaismuodot 8, 9, 10, 11



Kuva 17 Oinaismuodot 12 ja 13

Oinaismuotojen graafisella vertailulla voidaan vahvistaa ominaistajuusanalyysistä saadut tulokset. FEM-malli ja fyysinen rakenne vastaavat ominaismuodoiltaan hyvin paljon toisiaan. Graafiset muodot ovat silmämääräisesti identtisiä.

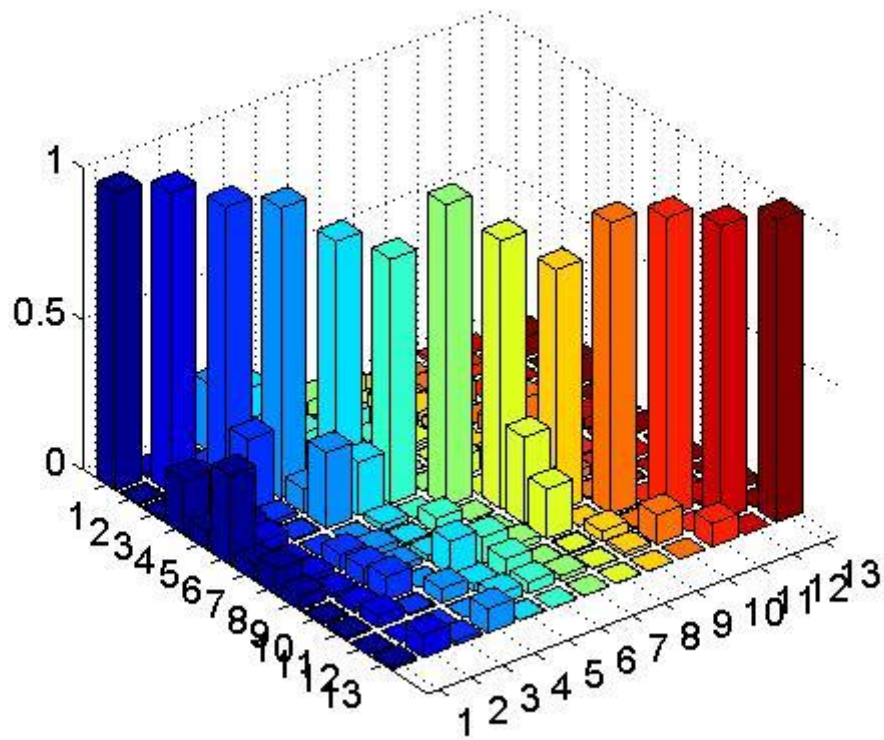
4.2.2 MAC-ominaismuotovertailu

Palkki- ja kuorimallille tehdään ominaistajuuksien vertailun lisäksi myös MAC (*Modal Assurance Criterion*) ominaismuotojen samankaltaisuusvertailu. MAC-vertailun avulla voidaan verrata fyysisestä rakenteesta kokeellisesti ratkaistuja ominaismuotovektoreita FEM-mallista analyttisesti ratkaistuihin ominaismuotovektoreihin. Kokeellisesti ja analyttisesti määritetyille ominaismuotovektoreille saadaan kerroin. Kerroin kuvastaa ominaismuotovektoreiden eroavaisuuksia. Ominaismuotojen kertoimet saadaan ratkaistua kaavasta

$$MAC(\varphi_{EMPi}, \varphi_{FEMi}) = \frac{|\varphi_{EMPi}^T \varphi_{FEMj}^T|^2}{(\varphi_{EMPi}^T \varphi_{EMPi})(\varphi_{FEMj}^T \varphi_{FEMj})} \quad (27)$$

jossa φ_{EMPi} kokeellisella moodianalyysillä tuotettu ominaismuotovektori ja φ_{FEMi} on analyttisellä menetelmällä tuotettu ominaismuotovektori. MAC vertailusta saadaan arvoja välillä 0 - 1. Mitä suurempi arvo on, sitä paremmin ominaismuodot vastaavat toisiaan. [12, s.1.]

MAC-vertailun tulokset tässä työssä käsiteltäville malleille olivat erittäin hyviä. Tulokset olivat parhaimmillaan jopa 0.998. MAC -vertailun tulokset on havainnollistettu kuvassa 18 ja taulukossa 5.



Kuva 18 MAC matriisi.

Taulukko 5 MAC matriisin lävistäjällä olevat tulokset

Moodi	Tulos
1	0,981
2	0,991
3	0,952
4	0,957
5	0,856
6	0,806
7	0,995
8	0,885
9	0,798
10	0,961
11	0,987
12	0,968
13	0,998

4.3 Vasteiden estimointi

Tässä insinööriyössä hyödynnetään *Virtual Sensing* hybridi-algoritmia. Hybridi-algoritmin ideana on käyttää analyyttistä sekä empiiristä VS-tekniikkaa. Tätä varten tarvitaan rakennetta vastaava FEM-malli sekä todellinen rakenne, josta fyysistä mittaustietoa saadaan. Työssä esitetyt palkki- ja kuorimalli vastaavat juuri näitä asioita. Palkkimalli toimii todellista rakennetta vastaavana FEM-mallina ja kuorimalli toimii todellisena rakenteena, johon kuvitellusti anturit fyysisesti asetetaan. [10, s. 1.]

Hybridi-algoritmin tavoitteena on luoda tarkkaa *full-field* dataa tutkittavasta rakenteesta n määrällä antureita. Saatava data riippuu kolmesta asiasta; antureiden sijainti ja lukumäärä, herätteen sijainti ja tyyppi (taajuus) sekä mittausvirhe.

Hybridi-tekniikassa on selviä etuja verrattaessa analyyttiseen ja empiiriseen tekniikkaan. Analyyttistä tekniikkaa käytettäessä on tunnettava rakenteeseen vaikuttava heräte ja empiiristä tekniikkaa käytettäessä tarvitaan suuri määrä antureita. Hybridi-tekniikan etuja ovat rajoitetun anturimäärän tarve, eikä rakenteeseen vaikuttavaa herätettä tarvitse tuntea. [10, s. 1.]

Prosessi etenee seuraavasti:

1. Ratkaistaan FEM-mallin ominaismuotojen avulla rakenteelle optimaaliset anturisijainnit EFI-menetelmällä.
2. Mitataan vaste fyysisestä rakenteesta (anturit (a), kuormitus (α)).
3. Mittausdatan avulla luodaan analyyttisellä VS-menetelmällä *full-field*-vaste.
4. FEM-mallista saatuun dataan lisätään kohinaa.
5. Datan ja hybridi VS-algoritmin avulla luodaan antureille uudelleen optimaaliset sijainnit.
6. Mitataan vasteet fyysisestä rakenteesta (anturit (b), kuormitus (β)).
7. Luodaan *full-field*-vaste uudelleen.
8. Tarkastellaan VS-tarkkuutta, vertaillaan anturiverkoilta (a) ja (b) saatua dataa keskenään.

Todellisessa tilanteessa käsiteltävästä rakenteesta tehtävä FEM-malli mallinnettaisiin todennäköisesti juuri kuorielementeillä. Kuorimallilla päästään huomattavasti tarkempaan lopputulokseen kuin palkkielementeillä. Tässä työssä kuorimalli kuitenkin toimii todellisen rakenteen korvikkeena. Tämä takia rakenteen FEM-malli tehdään palkkielementeillä, koska FEM-malli ja todellinen rakenne eivät voi olla yksi ja sama. FEM-malli sisältää aina mallinnusvirhettä ja olisi liian optimistista ja harhaan johtavaa käyttää tutkimuksessa yhtä mallia todellisena FEM-mallina ja todellisen rakenteen korvikkeena. Mallinnukseen liittyviä virheitä ovat muun muassa; materiaalin eroavaisuudet, vaimennuksen määrittäminen ja mallinnustekniikkaan liittyvät epätarkkuudet. [10, s. 1 - 2.]

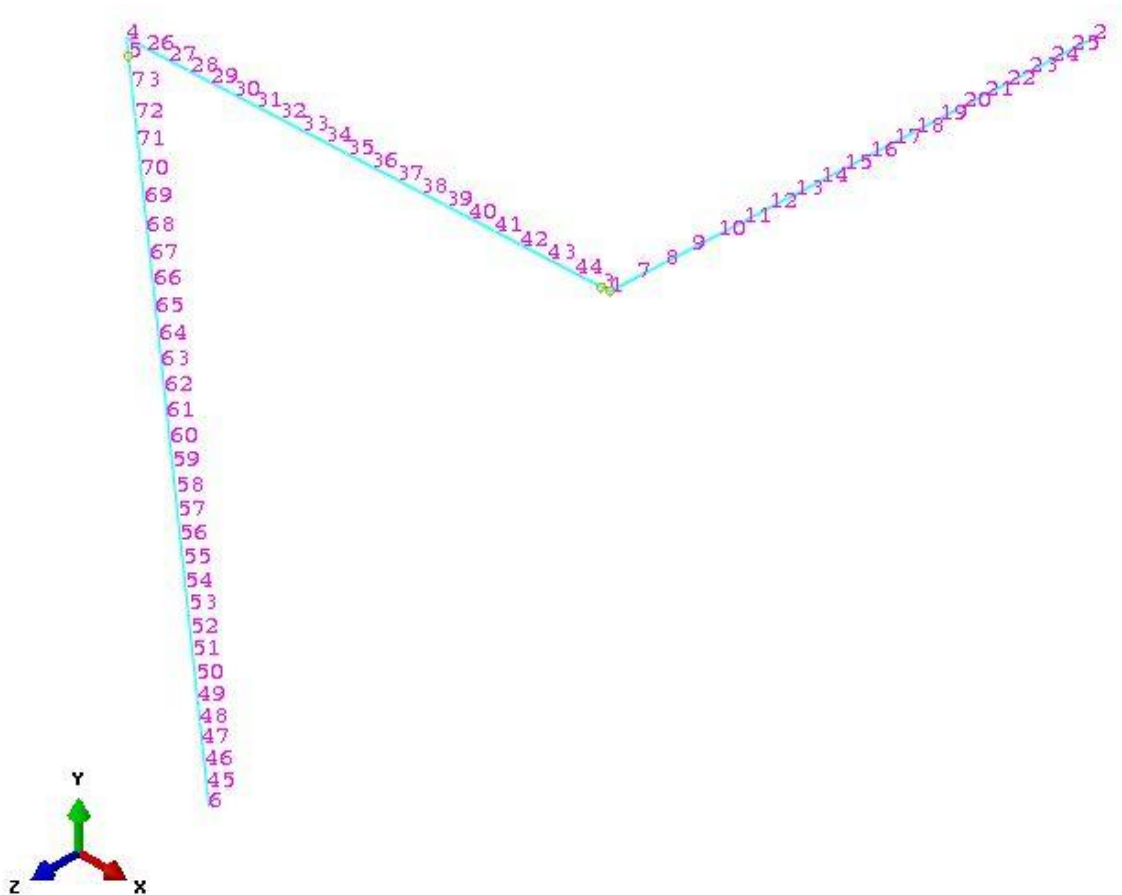
5 FEM-mallien suunnittelu ja rakenteen simulointi

5.1 Elementtityypit ja elementtiverkot

Palkkimallin elementtityyppinä käytettiin kuutioimaista Euler-Bernoullin B33-palkkielementtiä, jossa on kaksi solmua ja kolme integroimispistettä. Elementti toimii erittäin tarkasti esimerkiksi tämän työn kannalta olennaisessa dynaamisessa värähtelyanalyysissä. [7, s. 6-3.]

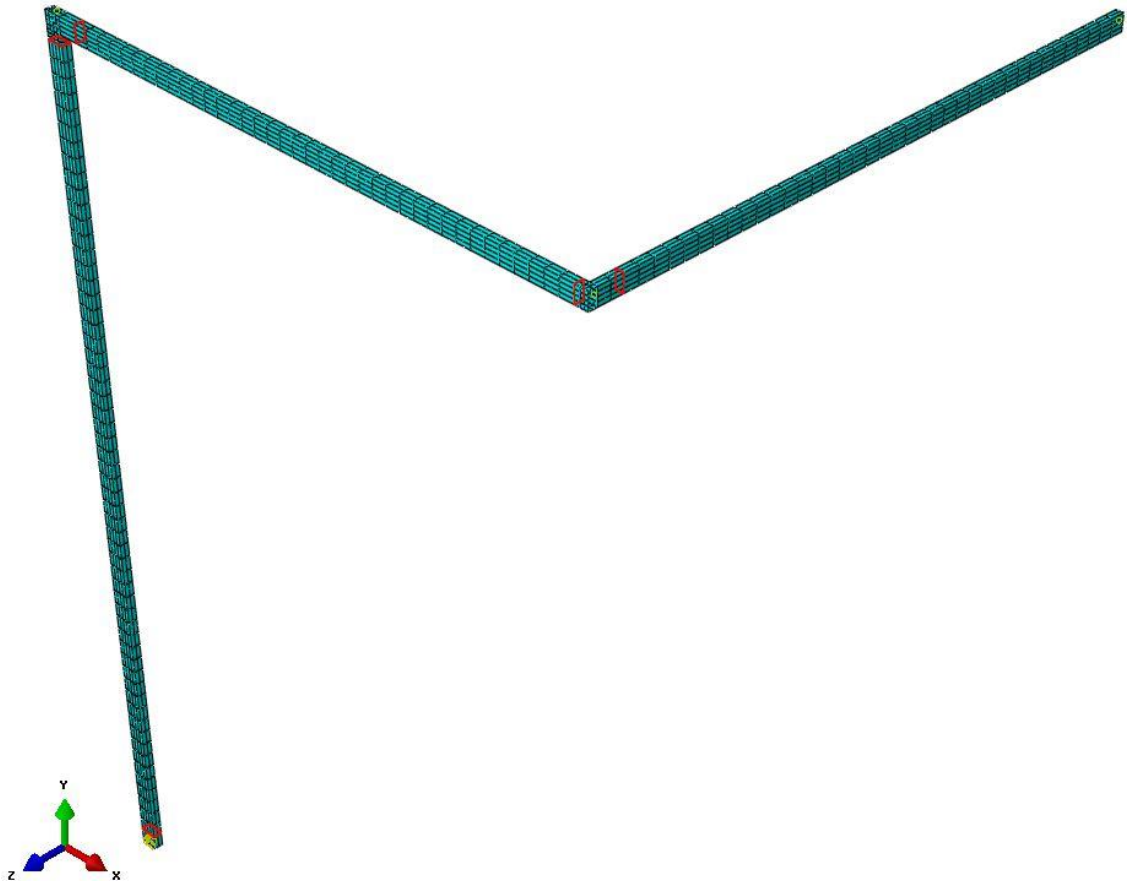
Kuorimallin elementtityypiksi valittiin S8R5, joka sopii sellaisten paksujen kuorien mallinnukseen, joihin kohdistuu leikkaavaa taivutusta, numero 5 indikoi vapausasteiden lukumäärää yhdessä solmussa. [7, s. 6-3.]

Elementtiverkon tiheydelle ei ole mitään määritelmää, kuinka tiheä sen tarvitsee olla. Oleellisin asia elementtiverkon luomisessa on se, että saadut tulokset vakiintuvat. Elementtiverkon luonti aloitetaan arvauksella, joka näyttää silmämääräisesti hyvältä ja sopivan tiheältä. Luotu elementtiverkko testataan esimerkiksi staattisella kuormituksella, joka toistetaan useampaan kertaan aina tihentämällä elementtiverkkoa, kunnes tulokset eivät enää merkittävästi muutu. Tässä työssä elementtiverkkojen testaaminen suoritettiin ominaistajuusanalyysin avulla. Ominaisajuusanalyysin laskenta on nopeaa, ja siitä tulostettavat suureet ovat nopeasti tulkittavissa. Vertailu suoritettiin ominaistajuuksia vertailemalla ja aika pian päästiin tulokseen, jossa tulokset vakiintuivat. Simulointi ja elementtiverkonluonti aloitettiin palkkimallista. Palkkimallissa käytetyssä elementtiverkossa globaali elementin koko 0.05 metriä, ja mallissa on 73 solmua ja 72 elementtiä. Palkkimallin elementtiverkko esitetty kuvassa 19, jossa solmupistenumerot ovat näkyvillä.



Kuva 19 Palkkimallin elementtiverkko

Kuorimallin elementtiverkon luomisen lähtöarvona käytettiin globaalia elementin kokoa, joka on puolet palkkimallissa käytetystä elementin koosta. Arvoksi määritettiin 0.025 metriä. Elementtiverkko on lähtökohtaisesti jo niin tiheä, että saadut tulokset olivat jo ensimmäisellä kerralla todella tarkkoja. Käytetyllä elementin koolla malliin muodostui 5752 solmua ja 1908 elementtiä. Kuorimallin elementtiverkko on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20 Kuorimallin elementtiverkko

Luodut elementtiverkot toimivat saatujen tuloksien perusteella, mutta vaativat tarkennuksia antureiden asettelua varten. Antureiden sijainnit valitaan palkkimallin solmupisteiden perusteella, ja kuorimallista on löydyttävä samat sijainnit putken pituus- ja leveys suunnassa. Solmupisteiden asettelusta tekee hankalaa palkkimallin ja kuorimallin eroavaisuudet, toinen vastaa fyysistä rakennetta ja toinen vain rakenteen keskilinjoja. Tästä johtuen kumpaankin malliin on tehtävä osituksia (*Partition*), jotka pakottavat solmupisteet malleissa samoihin pisteisiin. Palkkimalliin ositukset luotiin niiden liitoskohtien lähelle,

joissa kuvitellusti putken profiilin ulkoreunat kohtaavat. Ositukset näkyvät keltaisina pisteinä liitoskohtien läheisyydessä kuvassa 19.

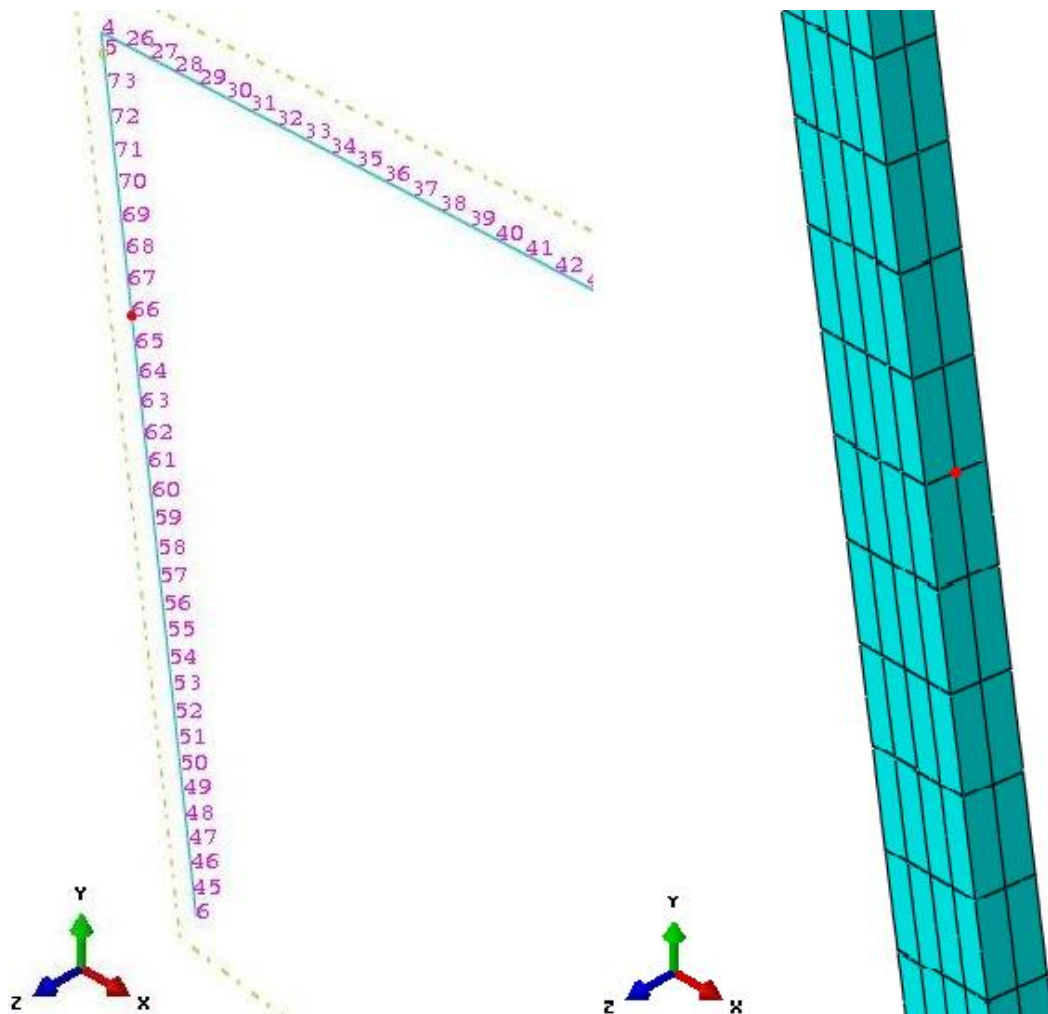
Kuorimalli vaatii useampia osituksia, ja niiden sijaintien hahmottaminen on hieman vaativampaa. Osituksia joutuu tekemään solmupisteiden sijaintien ja elementtiverkon järjestelmällisyyden takia. Kuvassa 20 ositukset on esitetty punaisilla viivoilla, jotka on tehty solmupisteiden sijainteja varten.

5.2 Antureiden asettelu ja mitattavat suureet

Rakenteeseen asetetaan 40 kappaletta kiihtyvyyssantureita ja 40 kappaletta venymäantureita. Antureiden sijainnit on määritelty palkkimallin solmupisteiden mukaan ja ne on asetettu kuorimalliin niitä vastaaville sijainneille riippuen mitattavasta vapausasteesta. Jokaiselle anturille on erikseen määritelty vapausaste, jota mitataan.

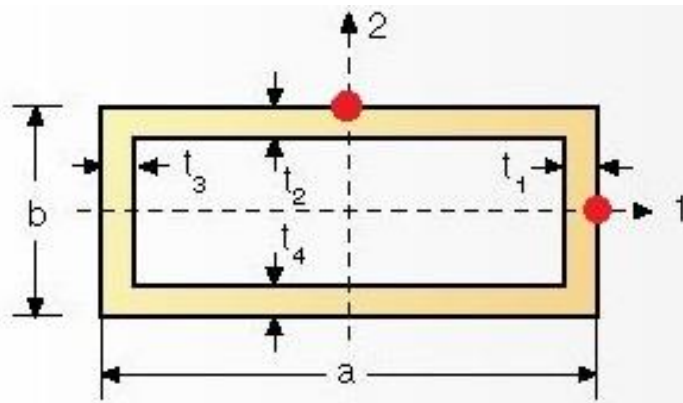
- **Kiihtyvyyksiä** mitataan kolmen globaalien koordinaatiston akselin suuntaan. Mitattavat kiihtyvyydet on nimetty Abaquksessa A1, A2 ja A3, nämä vastaavat yleisemmin kiihtyvyyksistä käytettyjä nimityksiä a_x , a_y ja a_z .
- Palkki- ja kuorimallista mitataan rakenteen palkin suuntaisia **venymiä** E11. Venymät mitataan profiilin poikkileikkauksen pitkältä- ja lyhyeltä sivulta, lokaalien suuntien 1 ja 2 positiivisesta suunnasta (kuva 23).

Kiihtyvyyssanturit asetetaan kuorimalliin mitattavan vapausasteen perusteella. Jos kiihtyvyyden mitattava vapausaste on globaalien x-akselin suuntainen (A1), niin anturi asetetaan kuorimalliin vastaavaan kohtaan kuin palkkimallissa siten, että anturi asetetaan kuorimalliin profiilin pinnalle positiivisen globaalien x-akselin puolelle. Sama asettelu tehdään A2 ja A3 kiihtyvyyksille y- ja z-akselin suunnassa. Kiihtyvyyssantureiden asettelu on havainnollistettu kuvassa 21.



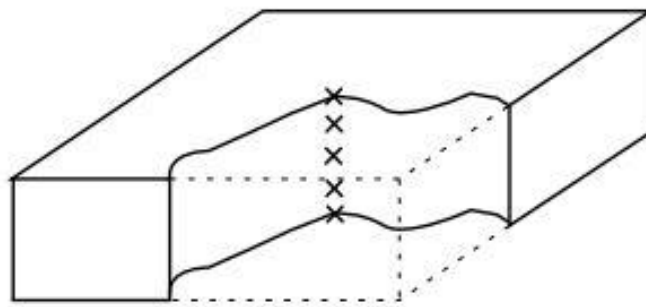
Kuva 21 Esimerkki palkkimallin solmuun 66 asetettavasta A1-kiihtyvyyssanturin asettelusta, eli globaalien x-suunnan kiihtyvyyssanturin asettelusta palkkimallissa (vasen) ja suurennettuna kuorimallissa (oikea).

Venymäanturit asetetaan kuorimalliin vastaaviin pisteisiin, joista venymät on palkkimallissa mitattu. Palkkimallia mallinnettaessa profiilin poikkileikkaukselle tulee määrittää tulostuspisteet (*Output Points*), josta venymät voidaan mitata. Tässä työssä tulostuspisteet on määritetty profiilin poikkileikkauksen lokaalien suuntien 1 ja 2 positiivisen suunnan profiilin pinnalle. Poikkileikkaukselle määritetyt tulostuspisteet on havainnollistettu kuvassa 22, jossa tulostuspisteet on korostettu punaisella pisteellä.



Kuva 22 Venymien tulostuspisteet palkkimallissa.

Kuorimalleille Abaqus laskee venymät automaattisesti kuoren ylä- ja alapinnalla. Kuorielementin poikkileikkauksella on valmiiksi määritetyt pisteet (*Section points*), joista venymät voidaan tulostaa. Näitä pisteitä ei tarvitse ennalta määrittää. Venymiä tulostaessa on valittava piste, josta venymät halutaan tulostaa (kuva 23). Pisteiden määrän voi myös itse määrittää. Tässä työssä käytetyssä elementissä on oletuksena kolme pistettä elementin poikkileikkauksella, joista ensimmäinen kuoren alapinnalla ja kolmas yläpinnalla.



Kuva 23 Section points [7]

Kiihtyvyy- ja venymäantureita varten tehdään solmupistejoukot (*Node set*), jotka vastaavat todellisessa tilanteessa käytettäviä antureita. Kiihtyvyydet voidaan suoraan tulostaa solmupisteistä, koska kiihtyvyydet ovat solmupistesuureita. Venymät taas ovat elementtisuureita, eikä niitä voida solmupisteistä tulostaa. Jotta venymät voidaan tulostaa halutuissa solmupisteissä, pitää rakenteesta saada halutut elementit mukaan analyysiin. Helpoin tapa on valita rakenteesta kaikki pinnat, joista venymiä halutaan mitata ja luoda niistä geometriajoukko (*Geometry set*). Tämä lyhentää analyysin laskenta-aikaa huomattavasti verrattuna siihen, että laskennassa olisivat mukana rakenteen kaikki elementit.

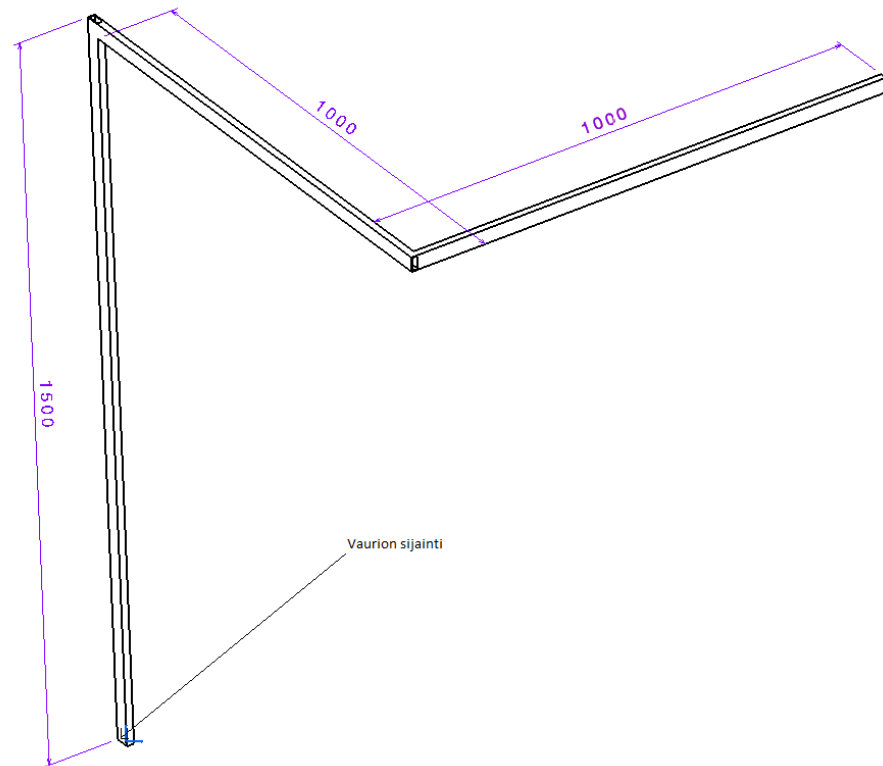
Jokaiselle anturille on ennalta määritetty sijainti ja mitattava vapausaste. Liitteissä 2 ja 3 on listattuna palkkimallin solmunumerot ja niistä mitattavat vapausasteet priorisoidussa järjestyksessä. Anturit asetetaan kuorimalliin kiihtyvyyksille ja venymille priorisointijärjestyksen mukaan 40 tärkeimmälle vapausasteelle.

Venymäantureita rakenteeseen asetetaan alkuperäisen määrittelyn mukaan 40 kappaletta, mutta kiihtyvyyksiantureita 35 kappaletta. Kiihtyvyyksiantureiden kohdalla muutos antureiden määrässä johtuu palkinsuuntaista kiihtyvyyttä mittaavien antureiden asettelusta. Esimerkiksi rakenteen vaakapalkille on määritetty mitattavaksi palkinsuuntainen kiihtyvyys neljästä kohdasta, ja näille kaikille antureille on valittava sama solmupiste palkin keskilinjalla olevalta solmupisteeltä, joka on palkin päädyssä kiinnityskohdassa. Tämä on tehtävä, koska kuorimallissa ei ole solmupisteitä muualla kuin profiilin pinnalla ja palkinsuuntainen kiihtyvyys on mitattava palkin keskilinjalla olevalta pisteeltä. Tämä antureiden asettelu voi tuottaa virhettä kyseessä olevista pisteistä mitattaviin kiihtyvyyksiin. Kiihtyvyy- ja venymäantureiden asettelu on esitetty liitteissä 4 ja 5.

5.3 Vaurion mallintaminen

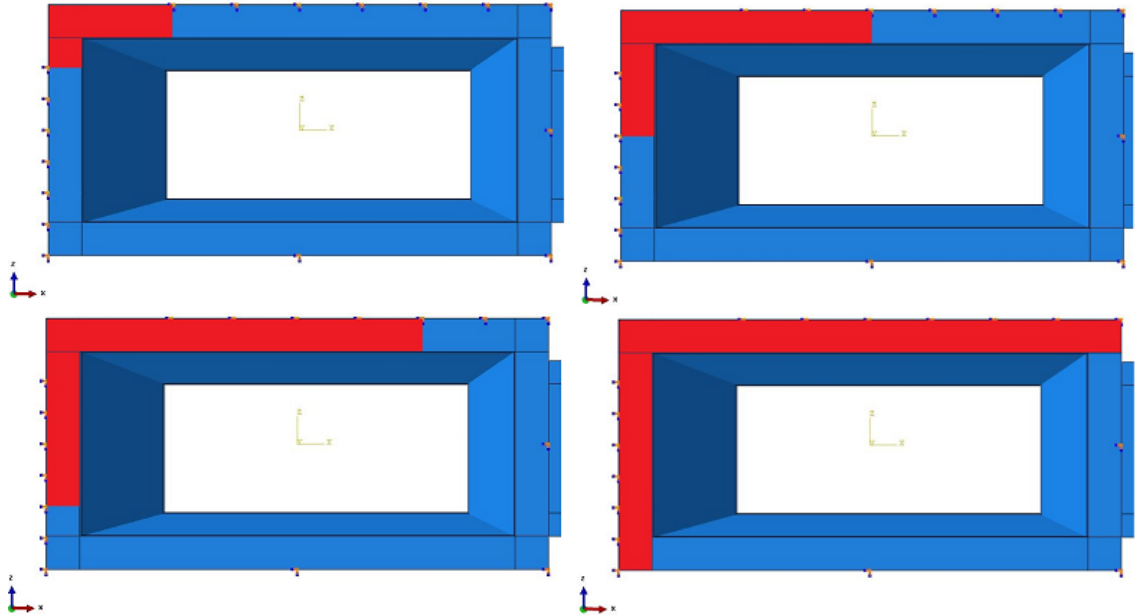
Pystyputken tyvessä oleva kiinnitys oletetaan olevan hitsiliitos, joka murtuu väsymisen seurauksena. Vaurio mallinnetaan siten, että vaurioituneella alueella ei ole minkäänlaisia kontakteja tai voimia välittäviä kiinnityksiä. Tämän tyylinen vaurio voidaan toteuttaa, koska on oletettavaa, että vaurioitunut osa putkesta pääsee liikkumaan kiinnitystason ylä- ja alapuolelle. Tällaista vauriota voidaan käsitellä lineaarisesti, mikä tekee simuloinnista yksinkertaisempaa ja simulointiajasta hieman lyhyemmän.

Vaurio mallinnetaan pystyputken tyveen, ristikkäiseen kulmaan uloimman vaakaputken vapaaseen päähän nähden. Vaurion sijainti on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24 Vaurion sijainti

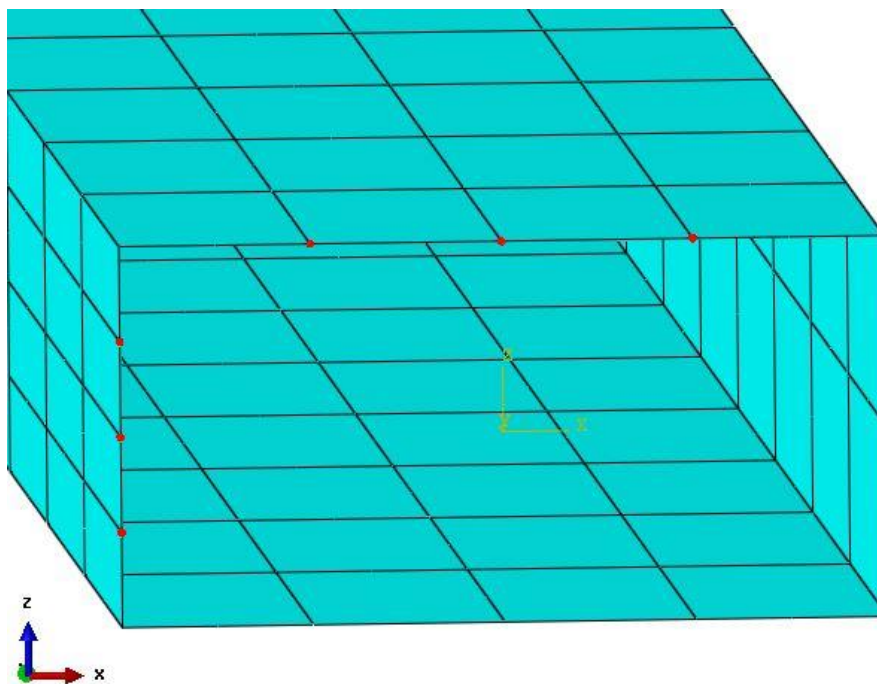
Rakenteella simuloidaan neljä erilaista vaurio-tilannetta, joiden suuruudet profiilin poikkileikkauksen pinta-alasta ovat 12,5%, 25%, 37,7% ja 50%. Erilaiset vaurio-tilanteet näkyvät kuvassa 25, jossa vaurioituneet alueet ovat korostettuna punaisella.



Kuva 25 Vauriot 12,5 %, 25 %, 37,5 % ja 50 %

Vaurion mallinnus on toteutettu *partioimalla*, eli jakamalla putken päädyistä vaurioituneet sivut neljään osaan, ja tekemällä kiinnitykset vain niiltä osin, missä hitsiliitos on edelleen ehjänä.

Partioinnit vaurio-tilanteita varten on tehty simulointien esivalmisteluvaiheessa. Kaikissa malleissa, myös ehjässä mallissa, on käytettävä samaa elementtiverkkoa tulosten vertailukelpoisuuden takia. Elementtiverkko vaikuttaa myös niiden solmupisteiden sijaintiin, jotka ovat kriittisiä rakenteeseen asetettavien anturien kannalta. *Partiointi* on havainnollistettu kuvassa 26, jossa *partiointikohdat* on merkitty punaisilla pisteillä.



Kuva 26 Partitointi

5.4 Värähtelyanalyysi

Rakenteelle tehdään värähtelyanalyysi, jossa rakennetta kuormitetaan 30 sekunnin ajan samanaikaisesti kolmella erilaisella satunnaisherätteellä. Vaikuttavat voimat on käsitelty erillisessä kappaleessa. Värähtelyn aikana rakenteesta mitataan kiihtyvyydet ja venymät rakenteeseen asetetuilta antureilta. Analyysi suoritetaan kahdella analyysiaskeleella. Ensimmäisessä analyysiaskeleessa, *Frequency stepissä* ratkaistaan rakenteen ominaistajuudet ja -muodot. Toisessa analyysiaskeleessa, *Modal dynamics stepissä* alkaa rakenteen kuormitus ja värähtelyiden mittaaminen, samalla askeleella määritetään rakenteen vaimennukset jokaiselle ominaismuodolle erikseen. Tässä työssä käytetään 2 % *Direct modal damping*-vaimennusta jokaiselle ominaismuodolle. *Modal dynamics*-askel hyödyntää rakenteelle laskettuja ominaismuotoja värähtelyn laskennassa. [8, s. 7-9.]

5.4.1 Aikainkrementti

Modal dynamics-analyysissä käytettävässä satunnaisherätteessä ilmenee herätteitä, joiden taajuus ω_{it} on suodatettu 0 - 100 Hz alueelle. Tämä perusteella analyysiin otetaan mukaan muodot, jotka ilmenevät rakenteessa 0 - 400 Hz taajuudella.

Tämä voidaan perustella kaavalla (28):

$$\omega_{co} = 4\omega_u \quad (28)$$

Rajoitetulla taajuusalueella olevat ominaisuodot käyttäytyvät dynaamisesti. Korkeampien taajuuksien ominaisuodot käyttäytyvät kvasistaattisesti, ja tämä otetaan huomioon laskennassa valitsemalla *Residual modes* analyysiaskelen määrittelyvaiheessa.

Jotta analyysi toimii stabiilisti, on siinä käytettävä riittävän pientä aikainkrementtiä. Inkrementti määritellään siten, että analyysissa huomioitavan suurimman (400 Hz) taajuuden jakso jaetaan 20 mittapisteeseen, joissa rakenteen värähtely lasketaan. Tarpeeksi tiheällä mittaustaajuudella varmistutaan siitä, että laskenta pysyy riittävän tarkkana eikä kuormituksen ja laskennan välillä synny isoja hyppyjä. Käytettävän aikainkrementin tulee olla enintään [11, s. 544.];

$$\Delta t = \frac{1}{20} T_{co}, \text{ jossa } T_{co} = \frac{2\pi}{\omega_{co}} \quad (29)$$

jossa T_{co} on jakson pituus sekunneissa ja ω_{co} huomioitava maksimitaajuus. Käytettäväksi inkrementiksi saadaan $\Delta t = 0,000125$ s.

5.4.2 Transienttivaihe

Rakenteeseen tuodun satunnaiserätteen aiheuttama värähtely luo rakenteelle transienttitilan. Transienttitilassa rakenteessa heräävät kaikki huomioitavat ominaisuodot, joilla rakenteen värähtely tapahtuu. Satunnaiserätteen jatkuessa rakenteen värähtelyn tila vakaantuu vaimennuksen takia. Tätä värähtelyn alkuvaihetta kutsutaan transienttivaiheeksi. Värähtelyanalyysin keston on oltava huomattavasti pidempi kuin transienttivaihe, jotta saadaan dataa vakiotilan värähtelystä, jonka vaikuttava satunnaiseräte aiheuttaa. Transienttivaiheen kesto voidaan ratkaista rakenteessa vaikuttavan vaimennuskertoimen avulla. Tässä työssä tehtävässä värähtelyanalyysissa olevan transienttivaiheen kesto on määritetty seuraavasti.

Ensimmäiseksi määritellään vapaan värähtelyn vaimennusajaksi:

$$t > \frac{\pi}{\delta_{\min}} \text{ jossa } \delta = \omega\xi = 2\pi f\xi \quad (30)$$

jonka avulla saadaan

$$t = \frac{\pi}{2\pi f \xi} = \frac{1}{2f \xi} = \frac{T}{2\xi} \quad (31)$$

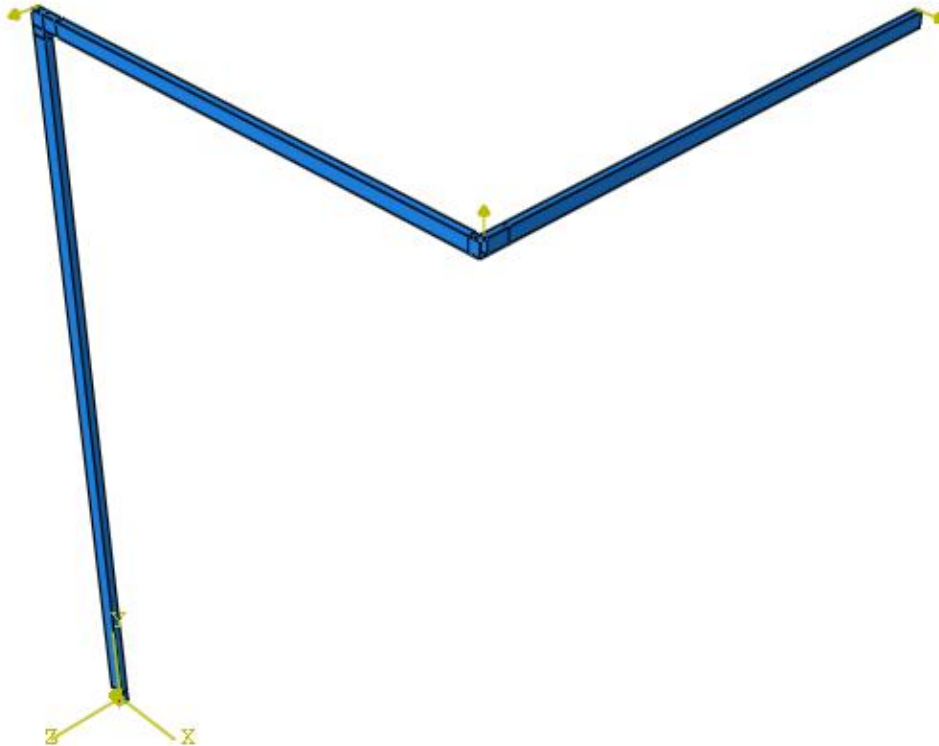
Sijoittamalla kaavaan jaksonaika $T = 0,5 \text{ s}$ ja vaimennuskerroin $\xi = 0,02$, saadaan transienttivaiheen kestoksi ratkaistua;

$$t = \frac{T}{2\xi} = \frac{0,5\text{s}}{2 \cdot 0,02} = 12,5\text{s} \quad (32)$$

Tämä vastaa tilannetta, jossa alimman ominaismuodon (2 Hz) värähtelyn amplitudi on pudonnut 23:nteen osaan alkuperäisestä värähtelyn amplitudista.

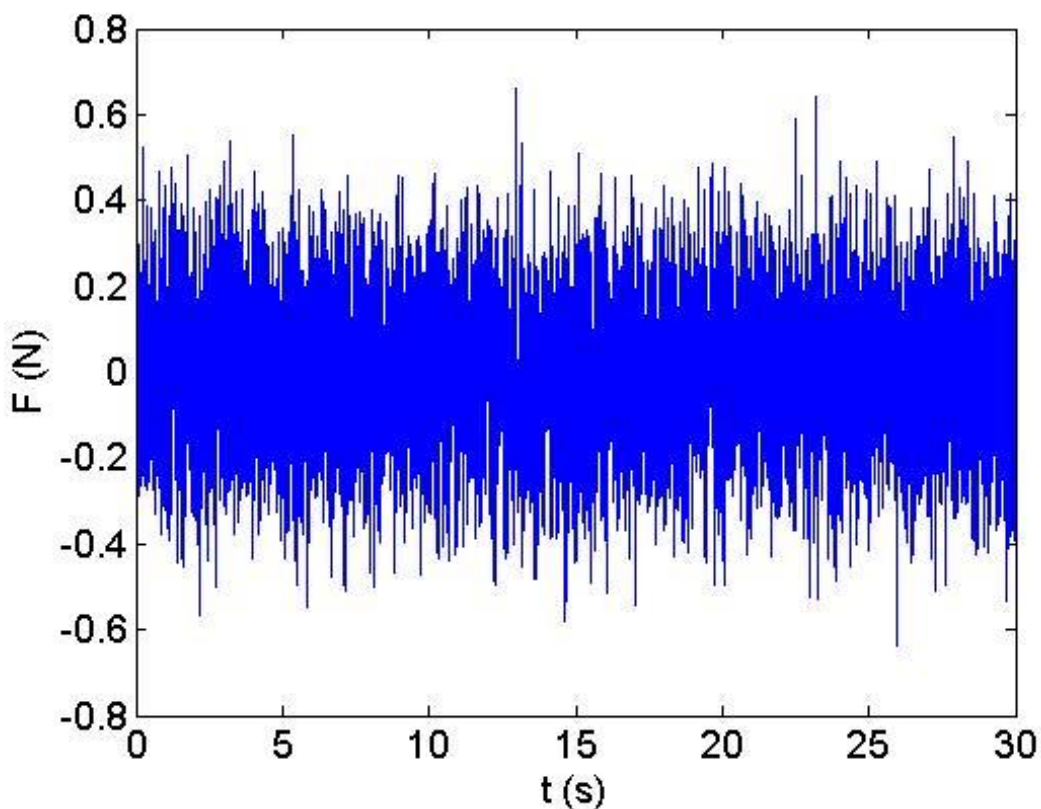
5.4.3 Vaikuttavat voimat

Rakenteeseen vaikuttaa kolme satunnaisherätettä, satunnaisherätteen käsite on selitetty kappaleessa 2.2. Voimat on asetettu rakenteeseen epäkeskeisesti niin, että taivutuksen lisäksi rakenteeseen syntyy vääntöä. Voimien suunnat on määritelty vaikuttamaan kukin eri globaalin koordinaatiston x-, y- ja z-akselin suuntaan. Voimien sijainnit ja suunnat on esitetty kuvassa 27.



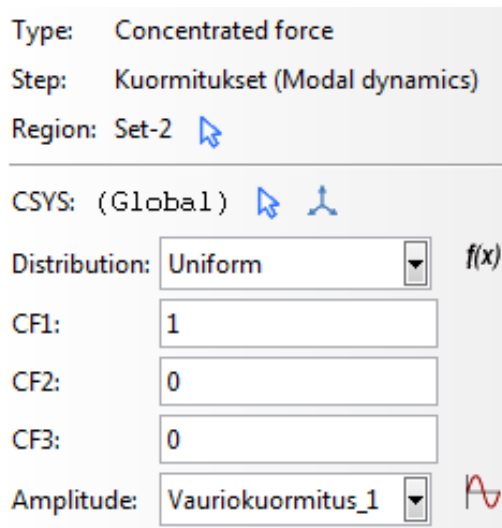
Kuva 27 Voimien sijainnit ja suunnat.

Satunnaisherätteet on luotu satunnaisgeneraattorin avulla generoimalla normaalijakaantuneita satunnaislukuja 0,125 ms välein. Kyseisen herätteen signaali sisältää tällöin taajuuksia välillä 0 - 4000 Hz. Tässä työssä tutkitaan 0 - 100 Hz taajuudella olevia herätteitä, joten generoidun herätteen signaali on suodatettu välille 0 - 100 Hz. Satunnaisherätteen voiman suuruus vaihtelee siis 0,000125 s välein. Vaikuttava voima on havainnollistettu graafisesti kuvassa 28 ja numeerisesti liitteessä 1.



Kuva 28 Satunnaisheräte

Kaikille kolmelle vaikuttavalle herätteelle luodaan erikseen omat kuormitushistoriat (*Amplitudes*), jotka asetetaan vaikuttamaan rakenteeseen pistemäisenä voimana (*Concentrated force*). Ehjän rakenteen kuormituksessa käytetään eri kuormitushistorioita, joita vaurioitilanteiden kuormituksessa käytetään. Kuormitusten eroavaisuudella tavoitellaan enemmän todellisuutta vastaavaa tilannetta. Rakenteeseen vaikuttavat voimat aktivoidaan *Modal dynamics*-askeleella. Käytettäessä kuormitushistoriaa voimille asetetaan vaikutuskerroin (kuva 29), jolla kuormitushistoriassa olevien voimien suuruus kerrotaan.



Kuva 29 Voiman vaikutuskerroin vauriotilanteessa

Värähtelyanalyysin realistisuuden kannalta on olennaista, että siirtymät pysyvät suhteessa pieninä. Kuormituksen vaikutuskertoimen toimivuutta testataan lyhytkestoisella testikuormituksella. Vaikutuskertoimen ollessa yksi, siirtymät olivat maksimissaan noin 1,5 mm, joka on lähellä todellisessa tilanteessa tapahtuvan värähtelyn suuruusluokkaa, joten vaikutuskertoimen voi todeta sopivaksi.

5.5 Laskennan suorittaminen

Inkrementtien suuresta määrästä johtuen laskenta on erittäin raskas ja vaatii laskennan suorittavalta tietokoneelta paljon suorituskykyä ja muistia. Laskettavien inkrementtien määrä 30 s ajanjaksolla on yhteensä 240 000 kappaletta. Laskentaa on mahdollista rajoittaa laskettavien inkrementtien osalta sekä laskennassa mukana olevien mittapisteiden tai alueiden määrällä. Rajoituksia tekemällä laskentaa saa nopeutettua ja vaadittavan muistin määrää rajoitettua tarpeen mukaan.

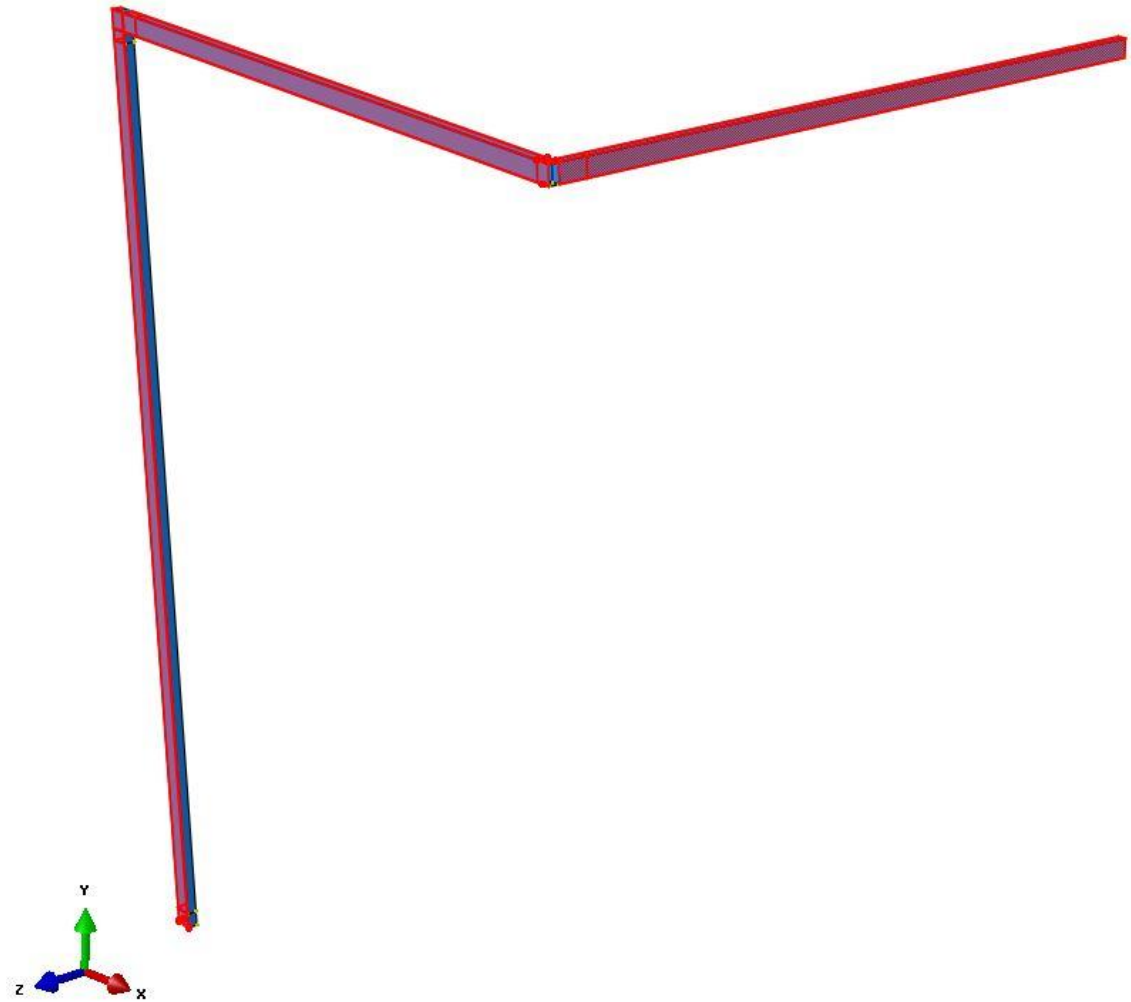
5.5.1 Laskennan rajoitukset

Laskenta jouduttiin suorittamaan koneilla, joiden laskentakyky on hyvin rajallinen ja ovat päivittäisessä käytössä koulun tiloissa. Tämän seurauksena laskennalle oli tehtävä erilaisia rajoituksia vaaditun muistin ja laskenta-ajan tarpeen pienentämiseksi. Alustavan suunnitelman mukaan värähtelyanalyysien jakson oli tarkoitus olla 60 s pitkiä ja haluttu tulosten tulostamistiheys joka viides inkrementti. Laskennassa olisi tällöin ollut yhteensä 480 000 inkrementtiä ja tulokset olisi tulostettu 96 000 inkrementin kohdalla. Kyseisellä inkrementtien ja tulostuksien lukumäärällä laskenta olisi kestänyt vähintään 8 h ja muistia olisi tarvittu vähintään noin 15 GB jokaisen simuloinnin osalta.

Analyysin kesto pudotettiin 30 s ja tulokset tulostettiin 20 inkrementin välein. Tällöin inkrementtien kokonaismääräksi muodostui 240 000 inkrementtiä ja tuloksien tulostaminen tapahtui 12 000 inkrementin kohdalla. Tehdyillä muutoksilla laskenta-aika muuttui noin 40 minuuttiin. Laskenta-ajan lisäksi oli tehtävä rajoituksia simulointien vaatimaan fyysisenmuistin ja levytilan tarpeeseen.

Kiihtyvyydet ovat solmusuureita, joten ne voidaan tulostaa suoraan valituista solmupisteistä. Kiihtyvyyksille valitut 35 solmupistettä eivät rasita laskentaa erityisesti, eikä niiden tulostaminen vaadi paljon muistia. Ongelmat syntyivät venymien laskennasta ja tulostamisesta. Venymät ovat elementtisuureita, minkä takia venymät on laskettava elementeissä. Ensimmäisissä testianalyyseissä oli mukana rakenteen jokainen elementti, mikä vaati huomattavan määrä muistia ja teki laskennasta erittäin hidasta. Jotta venymät voidaan ratkaista halutuissa pisteissä, pitää laskentaan ottaa mukaan pisteitä ympäröivät elementit. Valittujen elementtien minimimäärä on yksi elementti mitattavan solmun jokaisella puolella. Elementtien avulla Abaqus pystyy ratkaisemaan venymän solmupisteessä keskiarvottamalla venymät elementeissä. Tämä menetelmä olisi vaatinut elementtijoukkojen (*Element set*) tekemistä ja mahdollisesti rakenteen osituksia (*Partition*), joka olisi johtanut uuden elementtiverkon luomiseen. Helpompi tapa, jota tässä työssä hyödynnettiin, on luoda geometriajoukko (*Geometry set*), johon valitaan vain rakenteen pinnat, joista venymät halutaan mitata. Geometriasetin luominen on nopeaa ja yksinkertaista,

koska sen luominen ei vaadi osituksia eikä elementtiverkon muuttamista. Geometrijoukkoon valitaan vain pinnat, joilla venymäanturit sijaitsevat. Geometrijoukko on havainnollistettu kuvassa 30 punaisella korostettuina alueina.



Kuva 30 Geometry set

Mahdollisuuksien mukaan venymäanturien mittaussolmujen asettelu olisi kannattavaa määrittellä elementtien keskelle. Tällöin mittauksia varten voitaisiin valita vain ne elementit, joista venymät halutaan mitata. Venymien laskeminen elementeissä vaatii huomattavan määrän levytilaa ja laskenta-aikaa. Antureiden asettelu elementtien keskelle olisi myös laskennasta saatavien tulosten kannalta suotavaa. Ratkaistujen venymien tarkkuus on parhaimmillaan elementtien keskellä.

Antureiden asettelu elementtien keskelle on ongelmallista ja vaatii suunnittelua. Olisi tutkittava, miten solmupiste/mittapiste voidaan sijoittaa elementin keskipisteeseen niin, että

siihen voidaan asettaa myös esimerkiksi kiihtyvyyssanturi. Tällaisen anturiverkon luominen vaatisi huomattavan määrän esisuunnittelua, mutta nopeuttaisi ja mahdollisesti myös tarkentaisi suoritettavaa laskentaa.

5.5.2 Abaqus Command

Laskennan suorittamiseen liittyi myös ongelmia Abaqus/CAE:n käytön kanssa. Laskentaa ei voinut suorittaa käytössä olevilla koneilla käyttämällä Abaqus/CAE:n graafista käyttöliittymää. Ongelman syyksi muodostui kuormituksissa käytettyjen *Amplitudi*-käyrien pisteiden ja inkrementtien suuri lukumäärä. Pisteiden lukumäärä vaatii paljon fyysistä muistia, ja tiedonsiirto Abaqus/CAE:n ja Abaqus/Standardin välillä jumittuu, mikä pysäyttää laskennan sekä tietokoneen muun toiminnan. Tämän takia oli hyödynnettävä Abaqus Commandia laskennan suorittamisessa Abaqus/Standardilla. Laskennan suoritus tapahtuu käytännössä seuraavilla vaiheilla:

1. Varmistetaan, että mallinnuksen on virheettömyys, käytetyt reunaehdot, vaikuttavat kuormitukset, käytössä olevat stepit, tulokset ja niin edelleen
2. Mallista kirjoitetaan Input-tiedosto työhakemistoon Abaquksen Job managerin avulla
3. Avataan Abaqus Command, jossa siirrytään työhakemistoon MS-DOS-komennoilla, ja aloitetaan laskenta komennolla `Abaqus Job=<työn nimi> interactive`
4. Laskennan valmistuttua avataan Abaqus/CAE ja siirrytään Job manageriin ja valitaan lasketun työn kohdalta *Results*
5. Tulokset tulostetaan raporttiin Abaqus/CAE:n avulla tekemällä lasketusta datasta XY-dataa.

6 Tulokset

Tässä insinööriyössä tehdyn tutkimuksen tuloksena muodostui simulointimalli, jonka avulla saatiin simuloitua värähtelymittauksia vauriontunnistusta varten. Värähtelymittaukset suoritettiin ehjälle sekä vaurioituneelle rakenteelle. Rakenteen kiinnityskohdassa oleva vaurio mallinnettiin avoimena särönä. Vauriontunnistusta varten saatua mittausdataa käsiteltiin kahdella erilaisella *Virtual Sensing*:iin perustuvalla kohinanpoistomenetelmällä. Kohinanpoistomenetelmien käytön tavoitteena oli saada vauriontunnistuksesta tarkempaa antureilta saadun mittausdatan analysoinnin avulla.

Vauriontunnistuksen lisäksi saatiin toteutettua värähtelymittausten ja simulointimallin yhdistäminen. Tekniikka liittyy *Virtual Sensing*:iin. Yhdistämisen tavoitteena oli määrittää *full-field response*, eli vasteiden estimointi rakenteen niissä kohdissa, jossa ei ole fyysisiä antureita. Simulointimallin sekä fyysisen rakenteen ominaismuotojen avulla ratkaistiin antureiden optimaalinen asettelu tarkkaa vasteiden estimointia varten.

Vauriontunnistusta ja *Virtual sensing*:iä varten tehdyistä simuloinneista saadun mittausdatan käsittely ei ole osa tätä insinööriyötä, mutta mittausdatan analysoinnilla saavutetut tulokset kuitenkin esitellään osana työn tuloksia. Vauriontunnistukseen ja *Virtual Sensing*:iin liittyvän mittausdatan analysoinnin suoritti työn ohjaaja yliopettaja Jyrki Kullaa.

6.1 Vauriontunnistus

Simuloinneista saadun mittausdatan avulla rakenteelle luotiin EVS-kunnonvalvontakortit (*Extreme Value Statistic*). Mittauksista saatuun dataan on lisätty kohinaa, jotta tulokset olisivat realistisempia. Lisätyn kohinan signaali-kohinasuhde (*Signal to Noise Ratio, SNR*) on keskimäärin 30 dB. Kohinaa on lisätty tasaisesti kaikille antureille, jotta mittausvirhe on vastaavan suuruinen jokaisessa anturissa.

Luotujen EVS-kunnonvalvontakorttien opetusdatana käytettiin ehjästä mallista saatua dataa. Opetusdatana käytettiin ehjän mallin 8000 ensimmäistä mittausnäytettä, joiden mukaan valvontakortteissa olevat hälytysrajat määräytyvät. Hälytysrajojen toleranssit määräytyvät siten, että yksi tuhannesta mittausnäytteestä saa ylittää kyseisen rajan. Vauriomalleista saatua mittausdataa verrataan määritettyyn opetusdataan. EVS-valvontakortteihin tulostetaan residuaalin pääkomponentin (*Principal Component*) minimi- ja

maksimiarvot. EVS:n otoskokona on käytetty 100 mittausnäytettä (n=100). Valvontakortteihin on siis tulostettu jokaisen tilanteen mittausdata peräkkäin. Jokaisen mallin mittausdataan kuuluu 12 000 mittausnäytettä. Näytteiden kokonaismäärä on jaettu määritetyllä otoskoolla (n=100). Tämän perusteella jokaiselle mallille on valvontakortissa 120 mittausnäytettä, eli yhteensä kortissa on 600 mittausnäytettä, kun malleja on yhteensä viisi erilaista.

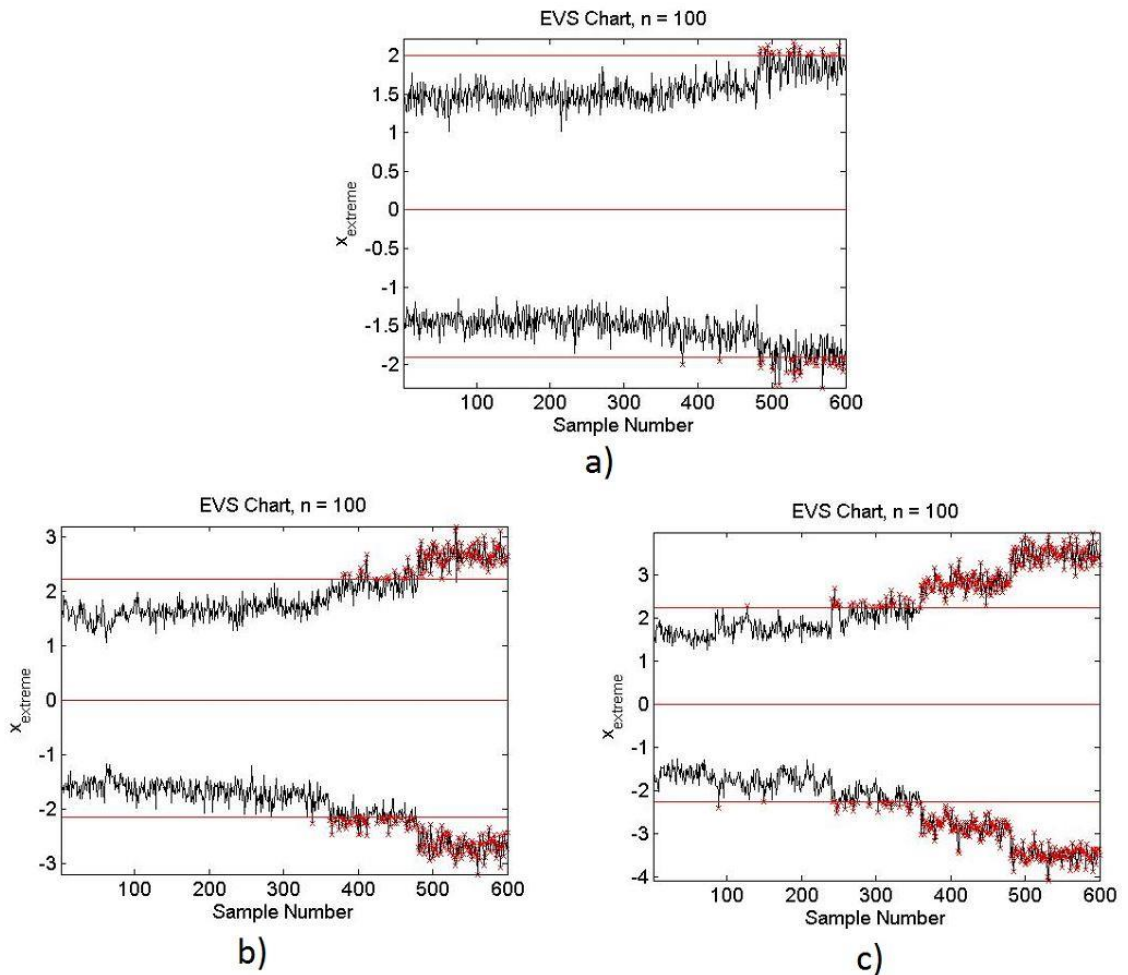
Valvontakortit luotiin raakadatasta sekä MMSE-, että Bayes-kohinanpoistomenetelmällä käsitelystä datasta.

Valvontakorttien tulkintaa varten käsitellään niissä olevien näytteiden jaottelu:

- ehjä malli; 1 – 12 000 mittausnäytettä, josta 1 – 8000 opetusdataa
- 12,5 % vaurio 12 001 – 24 000
- 25 % vaurio 24 001 – 36 000
- 37,5 % vaurio 36 001 – 48 000
- 50 % vaurio 48 001 – 60 000.

Ensimmäiseksi vertaillaan kiihtyvyyksille luotuja EVS-valvontakortteja, niissä olevaa dataa ja niiden eroavaisuuksia. Kiihtyvyyteen perustuvat valvontakortit esitetty kuvassa 31.

Kiihtyvyydataan perustuvassa vauriontunnistuksessa vauriot havaittiin tehokkaimmin

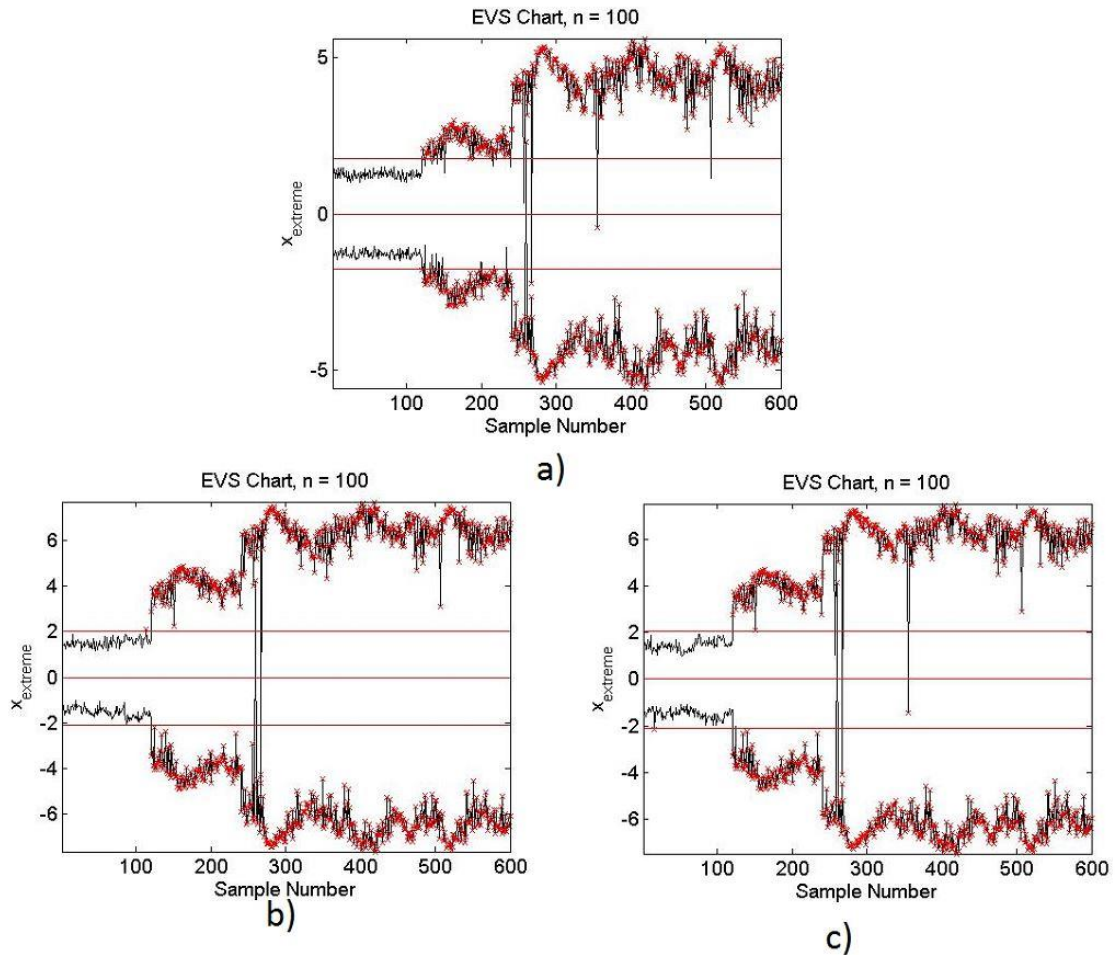


Kuva 31 Kiihtyvyyteen perustuvat EVS-valvontakortit a) raakadata b) MMSE suodatettu c) Bayes suodatettu

Bayes-kohinanpoistomenetelmällä suodatetusta datasta. Bayes-suodatetusta datasta havaittiin parhaimmillaan jopa 25 % vaurio, MMSE-datasta havaittiin parhaimmillaan 37,5 % vaurio ja raakadatasta havaittiin ainoastaan 50 % vaurio. 12,5 % vauriota ei havaittu mistään datasta.

Seuraavaksi vertaillaan venymille luotuja EVS-valvontakortteja. Venymiin perustuvat valvontakortit on esitetty kuvassa 32.

Venymiin perustuvassa vauriontunnistuksessa päästiin huomattavasti parempiin tulok-



Kuva 32 Venymiin perustuvat EVS-valvontakortit a) raakadata b) MMSE suodatettu c) Bayes suodatettu

siin. Kaikki vauriotilanteet havaittiin kaikesta mittausdatasta, jopa raakadastasta.

Tulokset ovat kuitenkin liian optimistisia, sillä datassa on mukana venymäanturi, joka sijaitsee särön kyljessä. Todellisuudessa särön sijaintia ei etukäteen tunneta, joten anturi voisi sijaita kaukana vauriosta.

Yhteenvetona vaurion tunnistuksesta saadut tulokset on esitetty taulukossa 6. Taulukossa on eriteltynä käytetty data, kohinanpoistomenetelmä sekä vaurion koko.

Taulukko 6 Yhteenveto vaurion tunnistuksen tuloksista

Mitattava suure	Kohinanpoistomenetelmä	Vaurion koko			
		12,5 %	25 %	37,5 %	50 %
Kiihtyvyys	Raakadata				X
	MMSE			X	X
	Bayes		X	X	X
Venymä	Raakadata	X	X	X	X
	MMSE	X	X	X	X
	Bayes	X	X	X	X
X = Havaittu vaurio					
Venymien tuloksissa on mukana särön kohdalla sijaitseva anturi					

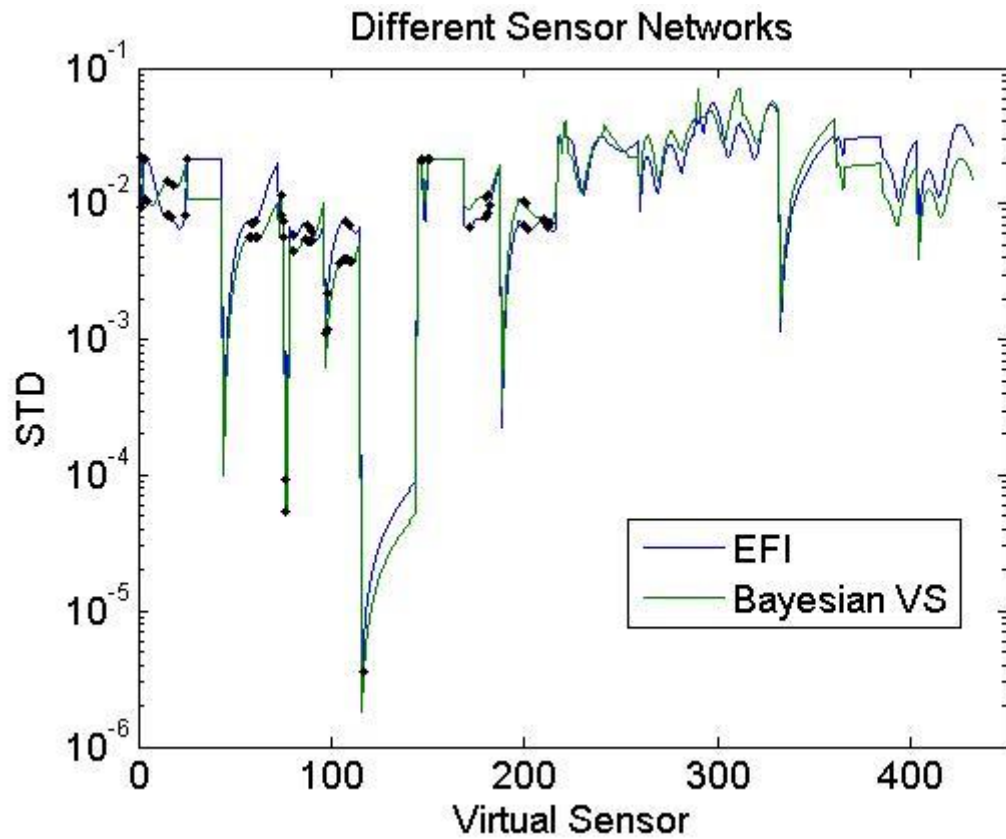
6.2 Virtual sensing

Virtual sensing prosessissa suoritetuissa värähtelymittauksissa käytettiin samaa kuormitushistoriaa kahdelle eri sensoriverkolle. Tuloksissa vertaillaan kahden eri sensoriverkon tuloksia. Vertailukohteena toimi EFI-menetelmällä luotu sensoriverkko, johon verrattiin Bayesian VS kokeellisella menetelmällä luotua sensoriverkkoa.

Sensoriverkon uudelleen luomisen tavoite oli pienentää antureiden tuottamaa mittausvirhettä. Sensoriverkoilta saadut tulokset 35 anturilla:

- EFI: Virheen STD = 0,0255
- OSP: Virheen STD = 0,0204

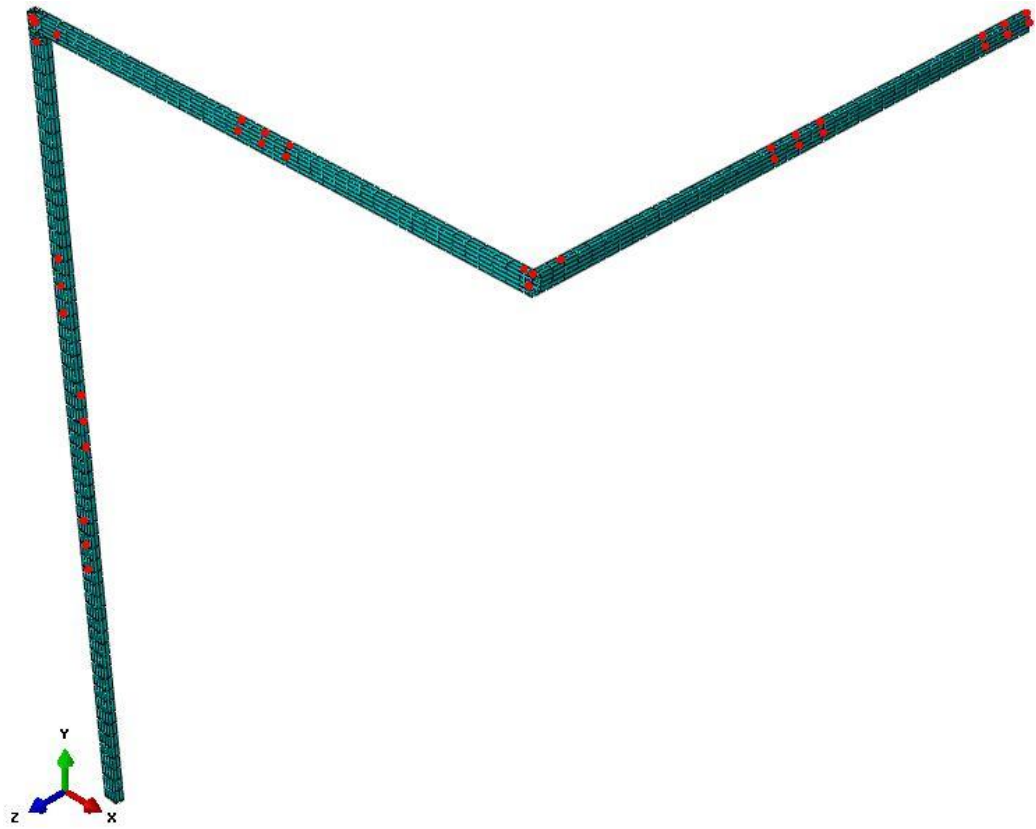
Tulokset esitetty graafisesti kuvassa 33.



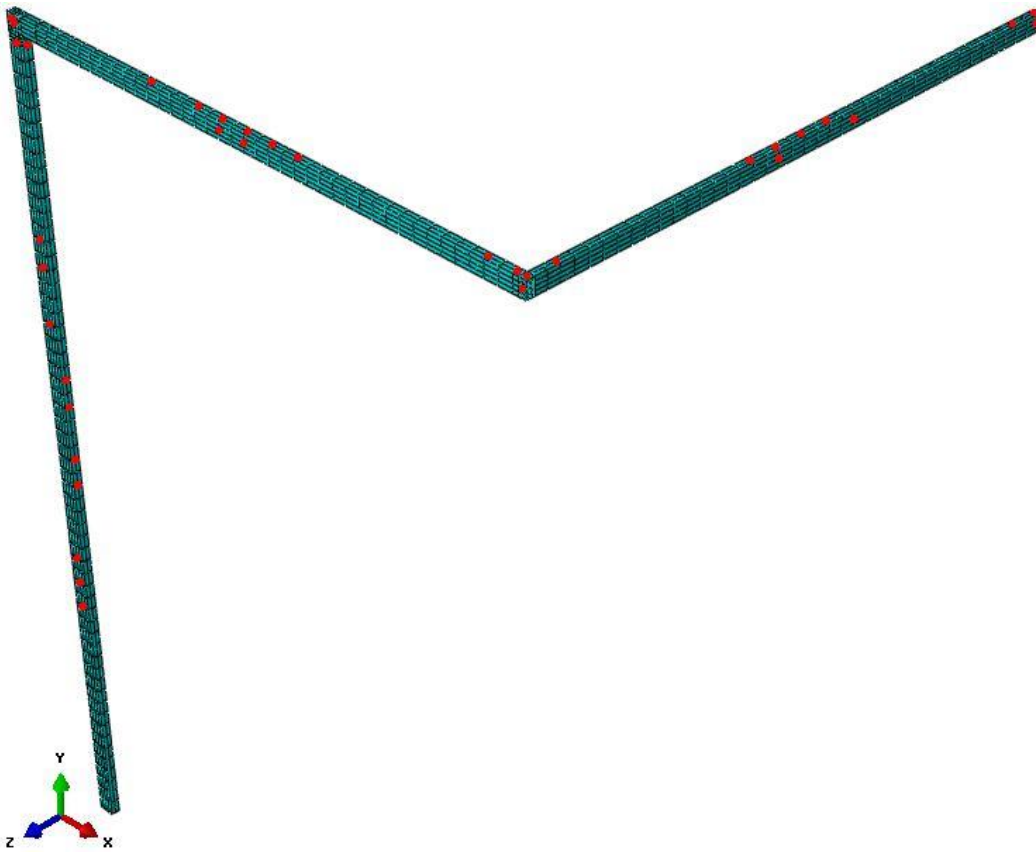
Kuva 33 VS-tulokset

Tulosten vertailun perusteella voidaan todeta, että antureiden optimaalinen uudelleen asettelu on onnistunut. Uusi anturiverkko tuottaa keskimääräisen virheen perusteella tarkempaa dataa, vaikka yksittäisten antureiden kohdalla virhe voi olla suurempi.

Kiihtyvyyssmittauksissa käytettyjen anturiverkkojen vertailu fyysisessä rakenteessa on esitetty kuvissa 34 ja 35.



Kuva 34 Vanha anturiverkko



Kuva 35 Uusi anturiverkko

6.3 Mallinnuksessa havaitut virheet

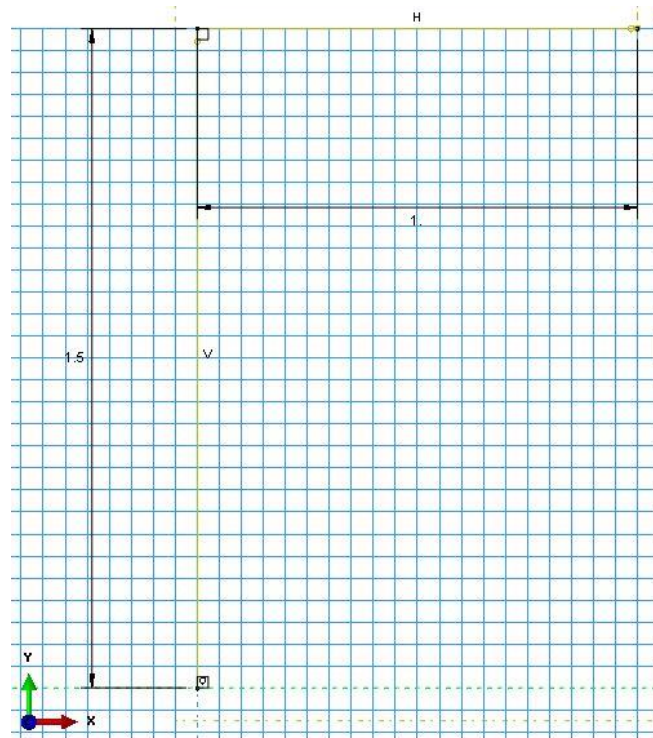
Tässä kappaleessa tarkastellaan asioita, joilla oli vaikutus saatuihin vaurion tunnistus ja *Virtual Sensing* tuloksiin

6.3.1 Venymät

Venymiin perustuvan vaurion tunnistuksen tulokset ovat liian optimistisia antureiden asetelun takia. Pystypalkin tyveen asetettu anturi sijaitsee syntyvän särön kohdalla. Todellisuudessa anturi sijaitsisi todennäköisimmin kaukana syntyvästä säröstä. Tämän asetelun takia vaurion tunnistus toimii todellista tilannetta huomattavasti tarkemmin. Ilman vauriokohdassa sijaitsevaa anturia, venymiin perustuva vaurion tunnistus antaa huomattavasti huonompia tuloksia, eikä vauriota havaittu yhtä tehokkaasti kuin kiihtyvyyksiin perustuvalla vaurion tunnistuksella.

6.3.2 Mitoitusvirhe

Rakenteen mitoitukseen on jäänyt mittavirhe, joka ilmeni vasta tuloksia vertailtaessa. Virhe tuli esille solmupisteiden koordinaattien vertailun yhteydessä. Virhe liittyy rakenteiden hahmotteluun mallinnusvaiheessa. Rakenteen mitat oli ennalta määritetty siten, että pystypalkin pituus on 1,5 m ja vaakapalkkien pituudet 1 m. Mallinnettaessa palkkimallia on jäänyt huomioimatta profiilin poikkileikkauksen mittojen vaikutus palkkien kiinnityspisteiden sijaintiin. Palkkimallin pystypalkin pituudeksi määritettiin 1,5 m, jonka yläpäähän ensimmäinen vaakapalkki kiinnittyy (kuva 36). Tässä vaiheessa olisi pitänyt huomioida vaakapalkin kiinnityskohta profiilin poikkileikkauksen mukaan hieman irti palkin yläpäästä. Sama virhe on toistunut vaakapalkkien kiinnityskohdassa. Tämän mallinnusvirheen seurauksena pystypalkissa sijaitsevat solmupisteet ovat kuorimallissa y-akselilla 15 mm lähempänä origoa kuin palkkimallissa. Samoin kuorimallin ulommassa vaakapalkissa solmupisteet sijaitsevat x-akselilla 7,5 mm lähempänä origoa. Tämä ei kuitenkaan merkittävästi vaikuttanut saatuihin tuloksiin, sillä palkki- ja kuorimallin solmupistekihtyvyyksissä ei ollut merkittäviä eroja.



Kuva 36 Mitoitusvirhe palkkimallissa.

Koska malleilla on samat materiaaliominaisuudet ja profiilit, vaikuttaa mallinnuksessa oleva mittaero hieman rakenteiden ominaistaajuuksiin.

7 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tehtävä tutkimus oli kaksi vaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa luotiin fyysistä rakennetta vastaava simulointimalli vaurion tunnistusta varten. Simulointimallilla mallinnettiin neljä erilaista vauriotilannetta. Vaurio mallinnettiin avoimena särönä, joka sijaitsee rakenteen kiinnityskohdan tyvässä. Rakenteeseen muodostuvat värähtelyt aiheuttavat kolme samanaikaisesti vaikuttavaa satunnaisherätettä. Mallista saatiin värähtelymittauksilla kohinaista mittaustietoa. Värähtelymittauksissa mitattavat suureet olivat kiihtyvyydet ja venymät. Saadun mittaustietoa avulla vertailtiin, minkä suuruisen särön havaitaan ja onko kohinanpoistomenetelmällä vaikutusta havaitun särön kokoon. Toisessa vaiheessa yhdistettiin värähtelymittaukset ja simulointimalli. Yhdistäminen toteutettiin hyödyntämällä prosessia, jota käytetään *Virtual Sensing*:in sovelluksissa. Tuloksena saatiin sensoreiden optimaalinen asettelu fyysisessä rakenteessa sekä mahdollisuus estimoida vasteita kaikkialla rakenteessa. Työn kummassakin vaiheessa analysoitavana rakenteena toimi suorakulmaisesta teräsputkesta valmistettu kolmiosainen teräsrakenne.

Vaurion tunnistusta varten suoritettavat värähtelymittaukset tehtiin ehjän rakenteen lisäksi neljälle eri suuruiselle vauriotilanteelle. Värähtelyn aikana rakenteesta mitattiin venymiä ja kiihtyvyyksiä. Saatuun mittaustietoon lisättiin kohinaa tasaisesti kaikkialle, jotta kaikilla antureilla on saman suuruisen mittausvirhe. Käytettävissä olevan kohinaisen mittaustietoa avulla rakenteelle luotiin EVS-kunnonvalvontakortit. Valvontakortit luotiin kiihtyvyyksille sekä venymille raakadatan lisäksi MMSE- ja Bayes-suodatetusta datasta. Saatujen tuloksia vertailtaessa kiihtyvyyksiin perustuva vaurion tunnistus toimi paremmin kuin venymiin perustuva. Venymätulokset olivat huomattavasti huonompia, kun tyvikohdassa sijainnut anturi otettiin pois käytöstä. Mittaustietoa analysoinnilla oli suuri vaikutus saatuihin tuloksiin. Kiihtyvyyden raakadatan havaittiin ainoastaan 50 % vaurio, kun taas Bayes suodatetusta datasta havaittiin parhaimmillaan 25 % vaurio.

Yhdistämismenetelmää varten työssä mallinnettiin kaksi FEM-mallia. Toinen toimi fyysisenä rakenteena, joka mallinnettiin kuorielementeillä ja toinen simulointimallina, joka mallinnettiin palkkielementeillä. Fyysisessä rakenteessa käytettävä teräsputken profiili valittiin simulointimallille tehtävällä ominaistajuusanalyysillä. Yhdistämisprosessin ensimmäisessä vaiheessa simulointimallin avulla luotiin potentiaaliset sensoripaikat fyysisessä rakenteessa. Näillä sensoreilla suoritettiin värähtelymittaus. Ominaismuotojen MAC-samankaltaisuusvertailun avulla varmistettiin mallien yhteensopivuus. Viimeisessä

vaiheessa rakenteelle määritettiin optimaaliset sensoripaikat *full-field*-datan avulla. Viimeiseksi mitattiin vasteet uudelleen asetetuilta antureilta, ja vasteita verrattiin simulointimallista saatuihin vasteisiin.

Insinöörityön tavoitteena oli tuottaa ja analysoida mittausdataa ehjästä sekä vaurioituneesta rakenteesta. Toisena tavoitteena oli yhdistää värähtelymittaukset simulointimallin kanssa vasteiden estimoimiseksi rakenteen kaikissa kohdissa. Kumpaankin tavoitteeseen päästiin.

Työssä käytettävissä malleissa on hieman parantamisen varaa. Palkkimalliin jäi mittavirhe, joka huomattiin vasta työn loppuvaiheessa. Lisäksi muutamien antureiden sijainti vaurion tunnistuksessa ei ole täsmälleen niille määritetyillä sijainneilla. Vaurion mallintaminen vaatisi myös hieman tarkennusta. Käytetyssä vaurion mallinnuksessa vaurio toteutettiin siten, että vaurioituneesta kohdasta poistettiin kiinnitykset, joten vaurioitunut kohta pääsee liikkumaan kiinnitystason ylä- ja alapuolella vapaasti.

Transienttialyysiin liittyviin ongelmiin olisi myös hyvä tutustua tarkemmin. Värähtelyn alussa tapahtuvan transienttivaiheen takia värähtelyanalyysistä on tehtävä pidempi, jotta saadaan mittausdataa vakio-tilassa olevasta rakenteesta. Tässä työssä tehdyssä värähtelyanalyysissä, jonka kesto oli 30 s, transienttivaiheen kesto oli 12,5 s. Transienttivaiheen laskentaan kului huomattavasti aikaa, lähes 50 % käytetystä laskenta-ajasta. Jatkotutkimuksena olisi kannattavaa selvittää vakio-tila-analyysin toteutettavuus. Ideana olisi se, että transienttivaihe tarvitsee ratkaista vain kerran tai ohittaa kokonaan. Tulevat analyysit voisi aloittaa suoraan vakio-tilassa olevasta rakenteesta. Tämä säästäisi huomattavasti aikaa ja joissakin tapauksissa rahaa.

Lähteet

1. Bakker, Frangopol & van Breugel, 2017. Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure –Taylor & Francis Group, London.
2. Kammer D.C., 1991. Sensor Placement for On-Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures vol. 14, University of Wisconsin, Wisconsin.
3. Pennala E, 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtely. Helsinki. Otatieto.
4. Piersol A.G & Paez T.L, 2010. Harris' Shock and Vibration Handbook Sixth Edition. New York. McGraw-Hill.
5. Worden, K., Farrar C. R., Manson, G. & Park, G. 2007. The fundamental axioms of structural health monitoring. Proc. R. Soc. A 2007 463 1639-1664; DOI: 10.1098/rspa.2007.1834.
6. Worden, K. & Dulieu-Barton J.M. 2004. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. Structural Health Monitoring 2004; 3; 85; DOI: 10.1177/1475921704041866.
7. Dassault Systèmes, 2012. Abaqus 6.12 Online Documentation: Getting Started with Abaqus: Interactive Edition.
8. Dassault Systèmes. 2014. Abaqus 6.14 Online Documentation: Getting Started with Abaqus: Interactive Edition.
9. SSAB ohutseinäputkivalikoima. Verkkodokumentti. <http://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/ohutseinaputket/>. Luettu 8.4.2017.
10. Kullaa J, 2016. Combined Empirical and Analytical Virtual Sensing for Full-Field Dynamic Response Estimation. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finland.
11. Bathe K.J., 1982. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 0732.
12. Allemang R.J., 2003. The Modal Assurance Criterion –Twenty Years of Use and Abuse. University of Cincinnati, Ohio.
13. Clough R.W. & Penzien J.,2003. Dynamics of Structures Third Edition. Computers & Structures, Inc., Berkeley California.

14. Yhden vapausasteen värähtely, Dynamiikka. 2017. Verkkodokumentti.
http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/dyna_pdf/varahtely.pdf. Luettu
5.4.2017.

Satunnaisgeneroitu heräte

Kuvassa listattuna ajan mukaan vaihtelevan satunnaisherätteen suuruus. Ensimmäinen luku kuvastaa ajanhetkeä ja seuraava luku voiman suuruutta newtoneissa.

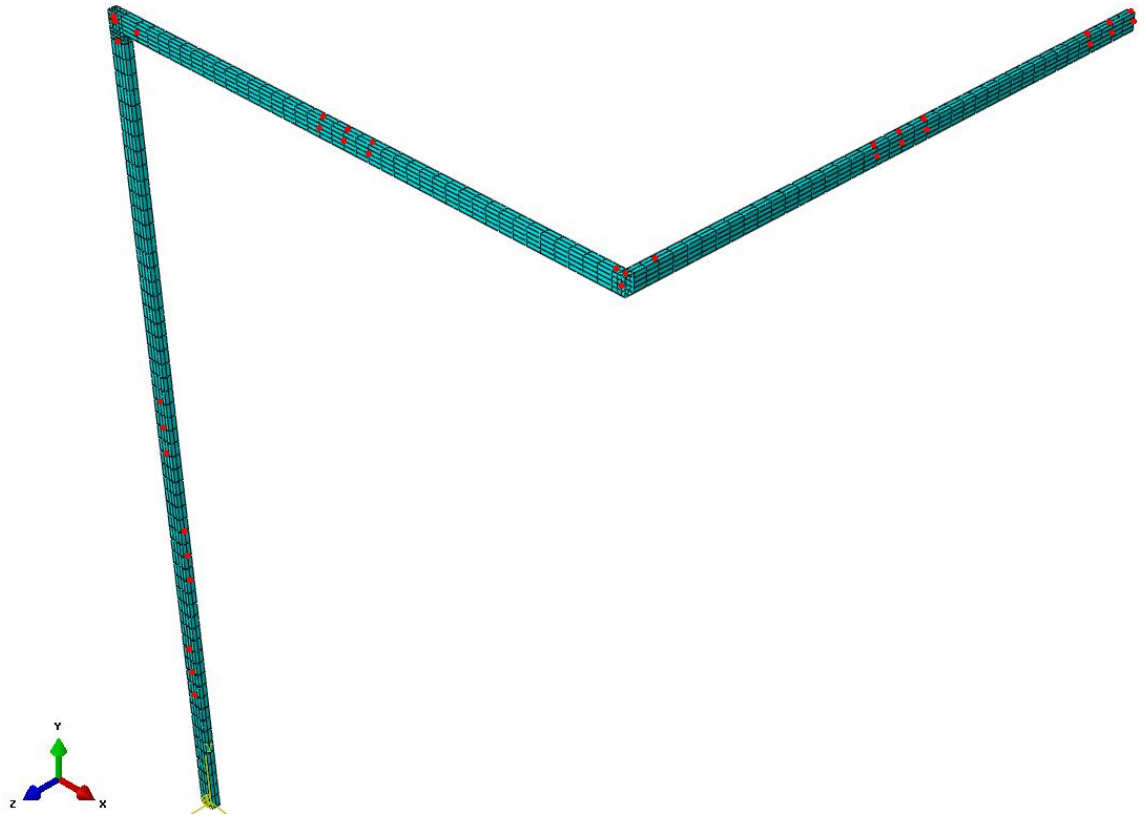
0	-2.01474E-012	0.000125	-3.91647E-011	0.00025	-3.6441E-010
0.001	-6.39081E-007	0.001125	-1.35852E-006	0.00125	-2.67188E-006
0.002	-5.09047E-005	0.002125	-7.31042E-005	0.00225	-0.000102241
0.003	-0.000494038	0.003125	-0.00060553	0.00325	-0.000731798
0.004	-0.00175417	0.004125	-0.00194947	0.00425	-0.00214268
0.005	-0.00294238	0.005125	-0.00295159	0.00525	-0.00290426
0.006	-0.00093205	0.006125	-0.000236425	0.00625	0.000588053
0.007	0.00867179	0.007125	0.0105984	0.00725	0.0127009
0.008	0.0289608	0.008125	0.0322372	0.00825	0.0356538
0.009	0.0583137	0.009125	0.0622892	0.00925	0.0662679
0.01	0.0889274	0.010125	0.0922843	0.01025	0.0954604
0.011	0.1096	0.011125	0.11098	0.01125	0.112044
0.012	0.111492	0.012125	0.110234	0.01225	0.108654
0.013	0.0930719	0.013125	0.089608	0.01325	0.085949
0.014	0.0611997	0.014125	0.0568342	0.01425	0.0524635
0.015	0.0273071	0.015125	0.023457	0.01525	0.0197409
0.016	0.000571557	0.016125	-0.00210109	0.01625	-0.004639
0.017	-0.0177838	0.017125	-0.0197911	0.01725	-0.0218017
0.018	-0.0352589	0.018125	-0.0379534	0.01825	-0.0408356
0.019	-0.0630007	0.019125	-0.0676131	0.01925	-0.0725021
0.02	-0.107343	0.020125	-0.113953	0.02025	-0.120742
0.021	-0.163687	0.021125	-0.170918	0.02125	-0.178078
0.022	-0.217541	0.022125	-0.223212	0.02225	-0.22854
0.023	-0.251835	0.023125	-0.254086	0.02325	-0.255835
0.024	-0.255609	0.024125	-0.253827	0.02425	-0.251576
0.025	-0.229414	0.025125	-0.224518	0.02525	-0.219356
0.026	-0.184593	0.026125	-0.178458	0.02625	-0.172303
0.027	-0.136291	0.027125	-0.130622	0.02725	-0.125087
0.028	-0.0951227	0.028125	-0.0907051	0.02825	-0.0864544
0.029	-0.0643486	0.029125	-0.0612082	0.02925	-0.0582174
0.03	-0.0433721	0.030125	-0.0414194	0.03025	-0.0396202
0.031	-0.0321817	0.031125	-0.0315193	0.03125	-0.0310238
0.032	-0.0313881	0.032125	-0.0319477	0.03225	-0.032624
0.033	-0.0382777	0.033125	-0.0393146	0.03325	-0.0403232
0.034	-0.0445306	0.034125	-0.0447241	0.03425	-0.0447208
0.035	-0.0398258	0.035125	-0.038125	0.03525	-0.0361677
0.036	-0.0195934	0.036125	-0.0161888	0.03625	-0.0126669
0.037	0.00899493	0.037125	0.0123291	0.03725	0.0154724
0.038	0.0279627	0.038125	0.0286166	0.03825	0.0287711
0.039	0.0179584	0.039125	0.0140825	0.03925	0.00960917
0.04	-0.0288862	0.040125	-0.036993	0.04025	-0.0454832
0.041	-0.101622	0.041125	-0.111311	0.04125	-0.12093
0.042	-0.173644	0.042125	-0.181027	0.04225	-0.187858
0.043	-0.214717	0.043125	-0.216502	0.04325	-0.217451
0.044	-0.20515	0.044125	-0.200145	0.04425	-0.194341
0.045	-0.144668	0.045125	-0.13433	0.04525	-0.123546
0.046	-0.0529877	0.046125	-0.0408723	0.04625	-0.0288365
0.047	0.0380191	0.047125	0.0476912	0.04725	0.0567937
0.048	0.0970033	0.048125	0.10099	0.04825	0.104141
0.049	0.105238	0.049125	0.102525	0.04925	0.099038
0.05	0.0639072	0.050125	0.0561195	0.05025	0.0479263
0.051	-0.00615654	0.051125	-0.0153651	0.05125	-0.0244485
0.052	-0.0727422	0.052125	-0.0792113	0.05225	-0.0850923
0.053	-0.105946	0.053125	-0.106766	0.05325	-0.106784
0.054	-0.0900937	0.054125	-0.0846118	0.05425	-0.078412
0.055	-0.0279632	0.055125	-0.017713	0.05525	-0.00705612
0.056	0.0625565	0.056125	0.0746025	0.05625	0.0866282
0.057	0.155277	0.057125	0.165633	0.05725	0.175543
0.058	0.223012	0.058125	0.228533	0.05825	0.233274
0.059	0.243769	0.059125	0.242336	0.05925	0.239961
0.06	0.205926	0.060125	0.197041	0.06025	0.187285
0.061	0.11224	0.061125	0.0973486	0.06125	0.0819001

Kiihtyvyyssantureiden sijainti ja vapausasteiden priorisointi vauriontunnistuksessa

Ensimmäinen sarake kuvastavat palkkimallissa olevaa solmun numeroa, seuraavat sarakkeet kuvaavat mitattavaa suuretta tärkeysjärjestyksessä. Ensimmäiset kolme kuvastaa kiihtyvyyksiä x-, y- ja z-suunnassa, seuraavat kolme kuvastavat kiertymiä akseleiden x, y ja z ympäri ja viimeiset kaksi palkin suuntaisia venymiä.

1	157	5	153	0	0	0	0	0
2	1	6	9	0	0	0	0	0
3	155	23	156	0	0	0	0	0
4	149	186	10	0	0	0	0	0
5	161	187	24	0	0	0	0	0
6	217	219	218	0	0	0	0	0
7	170	37	150	0	0	0	0	0
8	171	70	148	0	0	0	0	0
9	160	101	141	0	0	0	0	0
10	144	126	139	0	0	0	0	0
11	129	112	137	0	0	0	0	0
12	98	84	133	0	0	0	0	0
13	72	59	130	0	0	0	0	0
14	55	46	124	0	0	0	0	0
15	31	21	117	0	0	0	0	0
16	2	7	109	0	0	0	0	0
17	20	33	99	0	0	0	0	0
18	48	68	91	0	0	0	0	0
19	76	94	81	0	0	0	0	0
20	102	120	73	0	0	0	0	0
21	113	107	62	0	0	0	0	0
22	89	86	51	0	0	0	0	0
23	64	60	40	0	0	0	0	0
24	38	39	27	0	0	0	0	0
25	26	25	18	0	0	0	0	0
26	140	180	36	0	0	0	0	0
27	132	177	61	0	0	0	0	0
28	121	173	97	0	0	0	0	0
29	92	168	122	0	0	0	0	0
30	83	146	111	0	0	0	0	0
31	63	123	88	0	0	0	0	0
32	41	85	69	0	0	0	0	0
33	28	58	45	0	0	0	0	0
34	3	34	15	0	0	0	0	0
35	17	8	11	0	0	0	0	0
36	52	16	32	0	0	0	0	0
37	74	44	56	0	0	0	0	0
38	100	67	77	0	0	0	0	0
39	110	93	103	0	0	0	0	0
40	125	114	131	0	0	0	0	0
41	135	127	145	0	0	0	0	0
42	138	105	158	0	0	0	0	0
43	147	78	165	0	0	0	0	0
44	152	49	162	0	0	0	0	0
45	185	216	184	0	0	0	0	0
46	183	215	181	0	0	0	0	0
47	182	214	178	0	0	0	0	0
48	179	213	174	0	0	0	0	0
49	176	212	167	0	0	0	0	0
50	175	211	142	0	0	0	0	0
51	172	210	119	0	0	0	0	0
52	164	209	79	0	0	0	0	0
53	151	208	54	0	0	0	0	0
54	134	207	29	0	0	0	0	0
55	116	206	12	0	0	0	0	0
56	87	205	22	0	0	0	0	0
57	65	204	47	0	0	0	0	0
58	43	203	71	0	0	0	0	0
59	19	202	96	0	0	0	0	0
60	4	201	115	0	0	0	0	0
61	30	200	104	0	0	0	0	0
62	53	199	80	0	0	0	0	0
63	75	198	57	0	0	0	0	0
64	95	197	35	0	0	0	0	0
65	108	196	13	0	0	0	0	0
66	128	195	14	0	0	0	0	0
67	136	194	42	0	0	0	0	0
68	143	193	66	0	0	0	0	0
69	154	192	90	0	0	0	0	0
70	159	191	106	0	0	0	0	0
71	163	190	118	0	0	0	0	0
72	169	189	82	0	0	0	0	0
73	166	188	50	0	0	0	0	0

Kiihtyvyyssantureiden asettelu kuorimallissa vauriontunnistusta varten



Venymäantureiden asettelu kuorimallissa vaurion tunnistusta varten