

Aleksi Riihiaho

Otsikko

Diplomityö

|  |  |
| --- | --- |
| Tarkastaja: professori Reijo Kouhia Tarkastaja ja aihe hyväksytty  Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa x. xkuuta 2016 |  |
|  |  |

TIIVISTELMÄ

**ALEKSI RIIHIAHO**: Otsikko

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, XX sivua, YY liitesivua

Xkuu 2016

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Koneiden ja rakenteiden analysointi

Tarkastaja: professori Reijo Kouhia

Avainsanat: FEM

Tiivistelmä on suppea

ABSTRACT

**ALEKSI RIIHIAHO**: Heading

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, XX pages, YY Appendix pages

X 2016

Master’s Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Analysis of Machines and Structures

Examiner: Professor Reijo Kouhia

Keywords: FEM

The basics in English in Master’s theses.

ALKUSANAT

Tämä dokumenttipohja on laadittu TTY:n opinnäytetyöohjeen vuoden 2014 version mukaan edellistä pohjaa muokkaamalla. Työryhmä haluaa kiittää kaikkia ohjeen päivitykseen osallistuneita.

Alkusanoissa esitetään opinnäytetyön tekemiseen liittyvät yleiset tiedot. Tapana on myös esittää kiitokset työn tekemiseen vaikuttaneille henkilöille ja yhteisöille. Alkusanat eivät kuulu arvioinnin piriin, mutta niissä ei silti ole sopivaa moittia tai kritisoida ketään. Alkusanojen pituus on enintään 1 sivu. Alkusanojen lopussa on päivämäärä, jonka jälkeen työhön ei ole enää tehty korjauksia.

Tampereella, 25.8.2014

Toimi Kunta

SISÄLLYSLUETTELO

[1. Johdanto 1](#_Toc442205196)

[2. Palkkirakenteiden elementtimenetelmä 2](#_Toc442205197)

[2.1 Laskentamenetelmät 2](#_Toc442205198)

[2.2 Peruskäsitteistö 3](#_Toc442205199)

[2.3 Avaruuspalkkielementti 4](#_Toc442205200)

[2.4 Aktiivisarakeratkaisija 5](#_Toc442205201)

[2.5 STAFRA 5](#_Toc442205202)

[3. Käyttöliittymäsuunnittelun periaatteita 6](#_Toc442205203)

[3.1 Käyttäjäkokemus 6](#_Toc442205204)

[3.2 Käyttäjätarpeiden kartoitus 7](#_Toc442205205)

[3.3 Käyttäjäkeskeinen suunnittelu 7](#_Toc442205206)

[3.4 Käytettävyyden arviointi 7](#_Toc442205207)

[4. Graafisen käyttöliittymän ohjelmointi Windows-ympäristössä 8](#_Toc442205208)

[4.1 Suunnittelumallit 8](#_Toc442205209)

[4.2 MVC-arkkitehtuuri 8](#_Toc442205210)

[4.3 Windows Ribbon Framework 8](#_Toc442205211)

[4.4 OpenGL-piirtotyökalut 8](#_Toc442205212)

[5. Vaatimukset käyttöliittymälle 9](#_Toc442205213)

[5.1 Asiakasvaatimukset 9](#_Toc442205214)

[5.2 Yhteensopivuus 10](#_Toc442205215)

[5.3 Kilpailijat 10](#_Toc442205216)

[6. Käyttöliittymän toteutus 11](#_Toc442205217)

[6.1 Puunäkymä 11](#_Toc442205218)

[6.2 Tietorakenne 11](#_Toc442205219)

[6.3 Toiminnot 11](#_Toc442205220)

[6.3.1 Palkit 11](#_Toc442205221)

[6.3.2 Tuennat 11](#_Toc442205222)

[6.3.3 Kuormitukset 11](#_Toc442205223)

[6.3.4 Tulokset 11](#_Toc442205224)

[7. Jatkokehitystarpeet 12](#_Toc442205225)

[8. Yhteenveto 13](#_Toc442205226)

[Lähteet 14](#_Toc442205227)

LIITE A: M

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CC-lisenssi Creative Commons -lisenssi

LaTeX ladontajärjestelmä tieteelliseen kirjoittamiseen

SI-järjestelmä ransk. Système international d’unités, kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä

TTY Tampereen teknillinen yliopisto

URL engl. Uniform Resource Locator, verkkosivun osoite

*a* kiihtyvyys

**F**voima

*m* massa

Työssä käytetyt lyhenteet ja merkinnät määritellään ja selitetään kootusti aakkosjärjestyksessä työn alussa ja kun ne esiintyvät tekstissä ensimmäisen kerran Lyhenteiden kanssa käytetään tällöin sulkeita. Selitetekstin tyyli on tässä *Symbol description*. Tämän sivun lopussa on *Section Break*, jotta sivunumerointi menee oikein. Lisäksi johdannon yläotsakkeen (header) asetus *Link to Previous* on pois päältä, ja lisäksi sivunumeron muotoilusta on valittu *Start at 1* (eikä *Continue*).

.

# Johdanto

Vertex

Vertex-ohjelmistot

Miksi tehdään sisäänrakennettu FEM-laskentaosio Vertexin ohjelmistoihin?

Käyttöliittymän suunnittelu ja toteutus FEM-laskentaosiolle

Minkälaisia ongelmia on tarkoitus laskea? Asiakastarve

Vertexin aiemmat FEM-laskentamoduulit, Numerola

# Palkkirakenteiden elementtimenetelmä

Elementtimenetelmä (*Finite element method*, FEM) on matemaattinen menetelmä differentiaali- ja osittaisdifferentiaaliyhtälöiden reuna-arvotehtävien numeeriseen ratkaisemiseen. Elementtimenetelmällä voidaan muuntaa osittaisdifferentiaaliyhtälö lineaariseksi yhtälösysteemiksi, joka on helposti ratkaistavissa. Muunnos tapahtuu diskretisoimalla kenttäfunktion äärettömän suuri tuntematon arvojoukko äärelliseksi määräksi solmuarvoja, jotka voidaan ratkaista elementtimenetelmällä. Eri tekniikan aloilla tämänlaisia tehtäviä joudutaan ratkaisemaan paljon, joten elementtimenetelmä onkin nykyään levinnyt muun muassa mekaniikan, termodynamiikan, virtausmekaniikan, murtumismekaniikan, akustiikan ja sähkötekniikan aloille. [6][10]

PALKKIRAKENTEIDEN (Direct stiffness method)

Palkkirakenteiden elementtimenetelmä eroaa tästä yllä mainitusta yleistetystä elementtimenetelmästä siten, että siinä diskretoitavat osat, eli palkit, voidaan käsittää yksiulotteisiksi. Tämän johdosta palkkirakenteiden elementtimenetelmä voidaan perustaa suoraan rakenteiden mekaniikan analyyttisten ratkaisumenetelmien teorialle. Tämän tarkoittaa myös sitä, että palkkirakenteiden elementtimenetelmä johtaa teknisen taivutusteorian puitteissa tarkkaan ratkaisuun, toisin kuin likiarvoratkaisun tuottava numeerinen elementtimenetelmä. [10]

Tässä luvussa käsitellään teoriaa, jonka tietämystä tarvitaan palkkirakenteiden elementtimenetelmän käyttämisessä.

Alun perin elementtimenetelmä kehittyi lentokone- ja avaruusteollisuuden lujuusanalyysejä tehneiden insinöörien keskuudessa 1950-luvulla, josta se levisi nopeasti muun muassa erinäisiin rakennus- ja konetekniikan sovellutuksiin.

## Laskentamenetelmät

Tekninen taivutusteoria, Bathe s.234, Structural Analysis with the Finite Element s.33 [8]

Laskentamallin luominen, tärkeys, mallin tehokkuus, yksinkertaistaminen, Hibbler Idealization [4]

Bathe, laskennan vaiheet

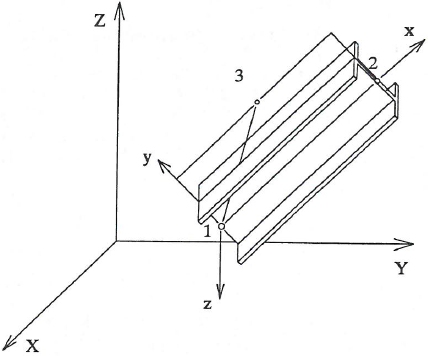
## Peruskäsitteistö

Rakenteiden mekaniikassa elementtimenetelmän perusajatuksena on jatkuvan materiaalikontinuumin diskretisoiminen äärelliseen määrään elementtejä, jotka liittyvät toisiinsa niin sanotuissa solmukohdissa. Rakenteen muodostamaa elementtijoukkoa kutsutaan laskentamalliksi.

Elementtien väliset solmut voidaan luokitella kahteen kategoriaan: lokaalisolmuihin ja globaalisolmuihin. Lokaalisolmuilla tarkoitetaan yksittäisen elementin päissä tai nurkissa olevia solmuja, joilla elementit liittyvät toisiin elementteihin. Globaalisolmuilla taas tarkoitetaan koko laskentamallin solmuja. Globaalisolmut yksilöidään yleensä juoksevalla numeroinnilla, mutta numeroinnin järjestyksellä ei ole laskennan kannalta väliä. Elementin suunnistus määrää sen alku- ja loppupään. Yksittäisen elementin lokaalisolmut numeroidaan järjestyksessä pienimmästä suurimpaan alkupäästä lähtien.

Lokaalikoordinaatistolla tarkoitetaan yksittäisen elementin paikallista koordinaatistoa, jossa x-akseli osoittaa palkin suuntaan alkupäästä loppupäähän päin. Y- ja Z-akselit valitaan yleensä palkin poikkileikkauksen pääsuuntien mukaan. Koko rakenteelle yhteiselle koordinaatistolle käytetään nimitystä globaalikoordinaatisto. Solmumittausjärjestelmällä tarkoitetaan kussakin tilanteessa voimassa olevaa koordinaatistoa, jossa solmumittaus suoritetaan.

Avaruuspalkkielementti on 2-solmuinen palkkielementti, jonka molemmilla solmuilla on 6 vapausastetta. allaKuva 1 on esitetty avaruuspalkkielementti, sen lokaalikoordinaatisto ja globaalikoordinaatisto. Elementin suunnistus kulkee solmusta 1 solmuun 2. Palkin yläpuolella oleva solmu 3 toimii suuntasolmuna, joka määrittää elementin lokaalikoordinaatiston y-akselin suunnan.



1. Avaruuspalkkielementti ja sen lokaalikoordinaatisto [11]

”Perusyhtälö”

Jäykkyysmatriisi

Sijoittelusummaus

Palkkielementtien solmumittausjärjestelmää joudutaan usein kiertämään, koska palkit voivat osoittaa globaalikoordinaatistossa mielivaltaiseen suuntaan. Jotta sijoittelusummaus voidaan suorittaa, tulee yksittäisten elementtien ja koko rakenteen solmumittausten olla samansuuntaiset. Koordinaatiston kierto elementin lokaalikoordinaatistosta globaalikoordinaatistoon tehdään niin sanotulla koordinaatiston kiertomatriisilla. Kiertomatriisi kootaan siten, että lokaalikoordinaatiston kantavektoreilla **i**, **j** ja **k** lausutun vektorin **v** sekä globaalikoordinaatiston kantavektoreilla **i**, **j** ja **k** lausutun vektorin **v** välillä on lineaarinen yhteys:

. (1)

KAAVA kiertomatriisista ja termeistä

Solmusuureet, siirtymien ja voimien mittaus

Solmut

Sauvaelementti

Palkkielementti

Laskentamalli

Pistekuormitukset

Kenttäkuormitukset

## Avaruuspalkkielementti

Jäykkyysmatriisin johto tasopalkkielementistä (derivointi 3-asteen polynomista, koska 4 vapausastetta)

Leikkausmuodonmuutokset

Timoshenko-palkki, leikkauslukkiutumisen esto

## Aktiivisarakeratkaisija

Stafra

## STAFRA

STAFRA *(Static analysis of frames)* on Lujuustekniikka Oy:n (nykyisin Vertex Systems Oy) kehittämä avaruuskehien statiikan ongelmien ratkaisuun tarkoitettu laskentatyökalu. Se perustuu tässä luvussa esiteltyyn palkkirakenteiden elementtimenetelmään ja sen elementit ovat Euler-Bernoulli -palkkiteorian mukaisia palkkeja. Palkkiteoriasta poiketen STAFRA ottaa huomioon myös leikkausjännityksistä aiheutuvat liukumat tehollisten leikkauspinta-alojen avulla. Teholliset leikkauspinta-alat palkin lokaalikoordinaatiston y- ja z-suunnissa saadaan kaavoilla

ja (2)

palkkielementin lokaalikoordinaatiston x-akselin yhtyessä poikkileikkausten pintakeskiöihin sekä y- ja z-akselit poikkileikkausten pääneliöakseleihin. Kertoimet ja aiheutuvat leikkausjännityksen epätasaisesta jakaantumisesta poikkileikkauksen alueelle ja ne ovat riippuvaisia poikkileikkauksen muodosta. STAFRA rajoittuu elementtien materiaalien osalta homogeenisiin, lineaarisesti kimmoisiin ja isotrooppisiin materiaaleihin. [11]

BD:ssä nykyisin

STAFRA:n päälle on tarkoitus kehittää käyttöliittymä G4, Plant, BD

# Käyttöliittymäsuunnittelun periaatteita

Asd

## Käyttäjäkokemus

Käyttäjäkokemuksella tarkoitetaan käyttäjän subjektiivista vaikutelmaa tuotteesta, joka syntyy käyttäjän ollessa vuorovaikutuksessa sen kanssa. Käyttäjäkokemus on siis tunnereaktioita, uskomuksia ja mieltymyksiä, jotka ilmenevät ennen tuotteen käyttöä, käytön aikana ja käytön jälkeen. Täsmällinen määritelmä käyttäjäkokemukselle löytyy ISO 9241-210 -standardista: ”Henkilön havainnot ja vasteet, jotka ovat seurausta tuotteen, järjestelmän tai palvelun käytöstä ja/tai ennakoidusta käytöstä”. [12]

Käyttäjäkokemukseen voidaan vaikuttaa luonnollisesti tuotteen käytettävyyttä parantamalla. Käytettävyyden kannalta oleellisinta on usein käyttöliittymän hyvä ja huolellinen suunnittelu. Käytettävyyden lisäksi käyttäjäkokemukseen vaikuttavat myös tuotteen esteettiset ominaisuudet kuten esimerkiksi visuaalisuus ja auditiivisuus. Tuotteeseen liittyvillä oheistarvikkeilla- ja palveluilla on myös vaikutuksensa käyttäjäkokemuksen syntymisessä. Tällaisia voivat olla esimerkiksi tuotteen käyttöohje tai tukipalvelu. [12]

Tuotteen käyttöympäristö vaikuttaa merkittävästi käyttäjäkokemuksen syntymisessä. Käyttöympäristö, eli käyttökonteksti, määrittelee minkälaisessa ympäristössä ja olosuhteissa tuotetta käytetään. Sen voidaan katsoa koostuvan tehtäväkohtaisesta, fyysisestä, sosiaalisesta ja teknisestä ympäristöstä. Teknisestä ympäristöstä esimerkkinä käy vaikkapa laite, jolla kehitettävää ohjelmistoa on suunniteltu käytettävän. Ohjelmiston käyttöliittymää suunniteltaessa on tiedettävä tarkkaan, minkälaisilla laitteilla loppukäyttäjät tulevat tuotetta käyttämään. Sosiaalisia käyttöympäristöjä ovat esimerkiksi koti ja työpaikka. Kotona tunnelma on usein rentoutunut kun taas työpaikalla ilmapiiri voi olla virallisempi. [12]

ISO, 1998 määritelmä käytettävyydestä, Nielsen käytettävyyden komponentit [7]



1. Käyttäjäkokemuksen syntyminen käyttäjän ja tuotteen välisessä vuorovaikutuksessa [12]

Miksi vaalia käyttäjäkokemusta? Ohjelmistonäkökanta

## Käyttäjätarpeiden kartoitus

## Käyttäjäkeskeinen suunnittelu

Paperikäyttöliittymällä prototypointi

## Käytettävyyden arviointi

# Graafisen käyttöliittymän ohjelmointi Windows-ympäristössä

Asd

## Suunnittelumallit

## MVC-arkkitehtuuri

## Windows Ribbon Framework

## OpenGL-piirtotyökalut

# Lähtötilanne ja Vaatimukset käyttöliittymälle

Alun perin vallinnut tilanne, Numerola G4:ssä, STAFRA BD:ssä

Tällä hetkellä Numerola: ei verkota oikein, kankea käyttöliittymä, ei ole yhtenäinen osa Vertexiä.

Tällä hetkellä STAFRA BD: ainoastaan ristikkolaskentaan räätälöity, ei voida laskea esimerkiksi aukkopalkkeja (lintel-rakenteita)

Palkkirakenteiden elementtimenetelmä myös G4:n, ja yleisellä tasolla BD:hen.

## Asiakasvaatimukset

BD: Tarve laskea lintel-rakenteita (palkki pilarien päällä, esim. ovi- tai ikkuna-aukko). Suuret ristikot ja avaruuskehät, joissa todella paljon osia. Teräsrankarakentaminen Australiassa, CFHS-palkit

Maintpartner Oy: Jigillä kehien siirtymät, SolidWorksillä liitoskohdan mallinnus ja analyysi

Sweco: FinnSapp, putkistojen jännitysanalyysejä, levy-, kuori- ja palkkielementtejä samassa mallissa. *”Nopeaan ja yksinkertaiseen suunnittelijan tekemään lujuusmitoitukseen 3D-suunnitteluohjelmissa on joitain rajattuja mahdollisuuksia olemassa. Niitä ei kuitenkaan käytetä virallisissa laskelmissa. Ne ovat toki hyviä, koska suunnittelija pääsee sillä melko lähelle oikeaa.”*

*”* *3D-mallinnusohjelman ja FEM ohjelman pitää ymmärtää toisiaan. Eli 3D-mallista ei saa jäädä mitään tietoa pois, joka sitten pitäisi FEM-ohjelmassa syöttää uudelleen FEM-malliin.”*

*”* *FEM-mallin muuttaminen pitäisi olla myös yhtä helppoa kuin se on 3D-mallinnuksen puolella. Myös FEM-mallin tekeminen tyhjästä alkaen olisi hyvä olla samalla tasolla kuin 3D-mallinnuspuolella.*

*Jos FEM- mallia päivitetään olisi hyvä myöskin olla olemassa linkki takaisin 3D-malliin joka päivittyisi myös takaisinpäin. Vrt.*

*Solidworks/ANSYS Tälläistä FEM/3D-CAD ohjelmien mallien välistä keskustelua ja mallien päivitystä kumpaankin suuntaan ei meillä ole täällä käytössä. ANSYS lisenssit ovat melko hintavia.”*

Vekaplan Oy: taiteltujen ohutlevyosien jäykkyys, pitempi ohutseinämäinen putkipalkki (solideilla yritetty), reaktiovoimat ulos

*”* *Usein tarve jäykkyyden laskemiseksi tulee jonkun ohutlevyosan taittelussa, kun yrittää optimoida levyrakennetta, ja siinä tulee hyvin äkkiä seinä vastaan, se ei vain osaa verkottaa.*

*Samoin vähän pitempi ohutseinämäinen putkipalkki; verkotus ei onnistu, ja jos onnistuu, kun on ensin poistanut pyöristykset, niin verkko on niin harva, että väkisin tulee mieleen, että voikohan tuohon luottaa, ja melkeinpä laskettava vielä käsin..”*

*”* *Lisäksi reaktiovoimat pitäisi saada ulos, jolloin niitä voisi käyttää kokoonpanon seuraavan osan kuormituksena. ”*

Pilkington Automotive Finland Oy: perustapauksia putkipalkkirakenteille ja yksittäisille osille

Nurmi Hydraulics: sylinterin nurjahduslaskenta

Elg-yhtiöt: palkkirakenteiden lujuustarkastelua

Vta Tekniikka Oy: hitsauskokoonpanoja, tappien ja sylinterien kiinnitysrakenteita

HUR Oy Ab: väsymisanalyysin tarve

Kaikkeen ei voida uudessa versiossa ehtiä, ensin ainakin G4 ja BD yhdistäminen palkkielementtien ratkaisulla. Sitten solidielementit

## Yhteensopivuus

Vertexin profiilit

G4, G4 Plant, BD

## Kilpailijat

SolidWorks

Jigi

ANSYS

# Käyttöliittymän toteutus

Asd

## Puunäkymä

## Tietorakenne

## Toiminnot

### Palkit

### Tuennat

### Kuormitukset

### Tulokset

# Jatkokehitystarpeet

Asd

# Yhteenveto

Asd

Lähteet

1. K.J. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982, 735 p.
2. M. Bordegoni, C. Rizzi, *Innovation in Product Design: From CAD to Virtual Prototyping*, Springer-Verlag London Limited, 2011, 188 p.
3. R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, R.J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, Inc, 1989, 630 p.
4. R.C. Hibbeler, *Structural Analysis*, Pearson Prentice Hall, 2012, 695 p.
5. M. Hirz, W. Dietrich, A. Gfrerrer, J. Lang, *Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 466 p.
6. R. Kouhia, M. Tuomala, *Johdatus mekaniikan ja sähkömagnetiikan numeerisiin menetelmiin*, luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, 417 s.
7. J. Nielsen, *Usability engineering,* Academic Press, 1993.
8. E. Oñate, *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics. Volume 2. Beams, Plates and Shells*, Springer, 2013, 864 p.
9. M. Rintala, J. Jokinen, *Olioiden ohjelmointi C++:lla*, Talentum, 2005, 466 s.
10. T. Salmi, K. Kuula, *Rakenteiden Mekaniikka*, Pressus Oy, Tampere, 2012, 464 s.
11. STAFRA-3D -manuaali, Insinööritoimisto Lujuustekniikka Oy, 1980, 57 s.
12. K. Väänänen, Käyttäjäkokemuksen perusteet -kurssin luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, 68 s.

Liite A: M

Lopuksi muutamia pohjaa päivittän